

CMPプロセスの材料除去メカニズムにおけるスラリーの基本的機能に関する研究

著者	橋山 雄一
発行年	2010-03-01
その他のタイトル	Study on basic functions of slurry for material removal mechanism in Chemical Mechanical Polishing process
学位授与年度	平成21年度
学位授与番号	17104甲情工第240号
URL	http://hdl.handle.net/10228/4773

平成 21 年度

博 士 論 文

CMP プロセスの材料除去メカニズムにおける
スラリーの基本的機能に関する研究

Study on basic functions of slurry for material removal mechanism
in Chemical Mechanical Polishing process

橋山 雄一

目次

第1章 緒 論.....	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 LSI の製造工程と平坦化技術.....	6
1.2.1 LSI の微細化と微細化による問題.....	6
1.2.2 LSI の製造工程における平坦化技術.....	7
1.2.3 平坦化技術の必要性	12
1.3 本論文の構成	14
参考文献.....	15
第2章 平坦化 CMP 技術.....	16
2.1 CMP 技術の概要	16
2.2 CMP 技術における課題	20
2.3 CMP プロセスにおける材料除去メカニズムとモデル.....	24
2.3.1 Preston の式.....	24
2.3.2 泉谷ら, Oliver らの材料除去メカニズム	25
2.3.3 Shi のモデル	27
2.3.4 Luo のモデル.....	29
2.3.5 藤田らが考える材料除去メカニズム.....	33
2.3.6 本間らのモデル	34
2.3.7 Runnels のモデル	35
2.3.8 三好らのモデル	37
2.4 研究の必要性和目的.....	39
参考文献.....	41
第3章 スラリー流れの可視化による材料除去メカニズムの考察.....	43
3.1 緒言	43
3.2 スラリーの可視化.....	44
3.2.1 可視化法	44
3.2.2 スラリー流れ可視化装置	46

3.2.3	実験条件	49
3.2.4	フラットパッドにおける蛍光剤の流れ	50
3.2.5	P15 格子溝パッドにおける蛍光剤の流れ	56
3.3	スラリー流れと研磨量	59
3.3.1	研磨実験の概要	59
3.3.2	実験結果と考察	61
3.4	結言	62
	参考文献	63
第 4 章	原子間力顕微鏡を用いたスラリー中の粒子分布状態の考察	64
4.1	緒言	64
4.2	スラリー中の研磨粒子の分散	65
4.2.1	スラリー中の粒子分布状態の観察実験の概要	66
4.2.2	実験結果と考察	68
4.3	スラリー中の研磨粒子分布モデル	73
4.4	結言	75
	参考文献	76
第 5 章	CMP プロセスにおける材料除去メカニズムの理論的考察	77
5.1	緒言	77
5.2	分子動力学法を用いたシミュレーションモデル	78
5.3	L.M.COOK の考え	81
5.4	摩耗における凝着摩耗現象	82
5.5	凝着除去モデルの提案	84
5.6	結言	85
	参考文献	85
第 6 章	化学反応層の性質と研磨粒子の機能	86
6.1	緒言	86
6.2	研磨粒子とウェハ間の相互作用力の測定	87
6.2.1	実験概要	87
6.2.1	実験結果と考察	89

6.3 AFM を用いた化学反応層のヤング率測定	92
6.3.1 実験概要	92
6.3.2 実験結果と考察	94
6.3 AFM を用いた研磨粒子の機能の観察	95
6.3.1 実験概要	95
6.3.2 実験結果と考察	98
6.4 結言	103
参考文献.....	104
第7章 研磨実験による凝着現象の確認	105
7.1 緒言	105
7.2 研磨実験	106
7.2.1 実験概要	106
7.2.2 実験結果と考察	108
7.3 パッド表面形状と研磨量.....	110
7.3.1 実験概要	110
7.3.2 実験結果と考察	113
7.4 結言	114
参考文献.....	115
第8章 結 論	116
関連論文 および 口頭発表	120
謝 辞.....	123

要 旨

超 LSI の製造工程で用いられる CMP 技術は広く知られている。CMP とは Chemical Mechanical Polishing の略で、研磨技術の一つであり、ナノメートルオーダーの平坦化を実現するための超精密加工法である。CMP 中の加工液であるスラリー、加工物であるウェハ、工作物であるポリシングパッドの研磨中の状態を考え、メカニズムを考察する事は、CMP による研磨加工を制御するために必要不可欠である。CMP における材料除去メカニズムは CMP の材料除去が複雑かつ微細な現象であるため、その全容の解明には至っていない。現在のところ、さまざまな材料除去メカニズムが提案されているが、スラリーとそのスラリーに含まれる研磨粒子の機能に着目した材料除去メカニズムは存在していない。本研究では材料除去メカニズムを考察するためにスラリーーウェハ間のスラリーの流れとスラリーによる化学反応と研磨粒子の作用に着目し、実験により材料除去メカニズムを考察した。本研究では特にシリカ粒子を含んだスラリーを使用する SiO₂-CMP における材料除去現象を検討した。

第 1 章で半導体の歴史と LSI を高性能化、高集積化するために、ウェハ表面の平坦化を行う必要性について述べた。

第 2 章では従来の CMP における材料除去の考え方を挙げ、それぞれの特徴および問題点を示した。従来の材料除去の考え方はスラリー中の研磨粒子がウェハ表面へと食い込み、削る作用により材料除去が発生すると説明している。しかしながら、ナノ粒子である CMP 用スラリーの研磨粒子は反応性の高い物質であり、その反応性を考慮した考え方は示されていない。研磨粒子の反応性を考慮したメカニズムを考え、実験的に検証を行う必要性について述べた。

第 3 章では研磨粒子がウェハへと作用するために重要な要素であるスラリーの流れについて考えた。スラリーの流れを可視化し、定性的な評価を行った。実験結果からスラリーは溝形状のないフラットパッドよりも溝形状を有する P15 格子溝パッドの方がウェハ面下へと流入しやすいことがわかった。また、フラットパッドと P15 格子溝パッドを使用した研磨実験の結果からは P15 格子溝パッドの方が研磨レートが高いことから、溝形状を有するパッドは作用粒子数

を増大させ、研磨レートを向上させていると考えられる。

第 4 章ではスラリー中の研磨粒子の分布状態について考察を行った。スラリー中の研磨粒子は粒子表面に電気二重層を形成し、スラリー中に均一に分散していると考えられている。そこで、実際に均一に分散しているか原子間力顕微鏡を用いて測定を試みた。測定の結果と研磨粒子分布の考察から研磨粒子は液中に稠密状態で分散していることを確認した。

第 5 章ではスラリー中の研磨粒子の材料除去メカニズムを考えるために、研磨粒子がウェハ表面の原子と結合し除去していくという分子動力学シミュレーションを基礎とした考え方、ガラス研磨中の化学反応論から研磨粒子によるウェハ表面物質の材料除去を考えた L.M.Cook の考え方、摩耗現象における凝着摩耗の 3 つの考え方を示し、それらを基礎として CMP 中の材料除去メカニズムを考察した。スラリー中の研磨粒子とウェハ表面との間に働く凝着力によりウェハ表面物質の除去が発生していると推測し、その凝着除去現象のモデルを提案した。

第 6 章では原子間力顕微鏡を用いた実験を行い、CMP 中の研磨粒子とウェハ表面の状態を調べた。原子間力顕微鏡で使用する探針の先端は SiO_x-CMP で使用される研磨粒子とほぼ同じ大きさであることから、探針先端を研磨粒子と見立てて、材料除去の模擬的な実験を行った。探針先端とウェハ表面との間に働く力を測定できるフォースカーブ測定から研磨粒子とウェハ表面との間に働く力とウェハ表面の化学反応層のヤング率を調べた。実験結果から、液中では探針先端がウェハ表面へと吸着され、結合する現象が観察でき、吸着力よりも結合力の方が強いことがわかった。また、化学反応層のヤング率は液中で低下しており、アルカリ性溶液中ではさらに軟化していることがわかった。次に探針先端を押し込む実験を実施し、探針先端を研磨粒子と見立て第 5 章で示した凝着除去現象が発生しているか調べた。実験結果から探針先端へウェハ表面の物質が凝着により付着していることがわかった。これらの結果から、スラリー中の研磨粒子は原子間結合力が弱まっている軟質なウェハ表面に吸着し、結合した後、凝着作用によりウェハ表面の材料を除去すると考えられる。

第 7 章では実際に CMP を行った後、スラリー中の研磨粒子の変化を観察した。粒径計測の結果と TEM の観察結果から、研磨後の粒子径が大きくなることがわかった。また、微小凹凸を持つマイクロパターンパッドを使用した研磨結果が

ら，研磨レートを向上させるためには研磨粒子がウェハへと凝着しウェハ表面物質を除去する作用を促進することが重要であることがわかった．

第 8 章では第 3 章～第 7 章の各種検討から明らかとなったスラリーの流れと材料除去メカニズムの関係，実験によりスラリー中の化学成分によるウェハ表面の軟化とスラリー中の研磨粒子がウェハ表面原子を凝着除去することを確認し CMP の材料除去メカニズムの考え方を提案し，本論文の結論とした．

第1章 緒 論

1.1 本研究の背景

近年，エレクトロニクス関連製品は急速な進歩を遂げている．エレクトロニクス関連製品の急速な発展にはその中心的存在の半導体の性能向上によるところが大きい．半導体素子であるトランジスタは1947年に米国 AT&T Bell 研究所の Walter Brattain, John Bardeen, William Bradford Shockley らのグループにより発明された．それはゲルマニウムに細い針を接触させた点接触型トランジスタ（図 1.1）といわれるものである．

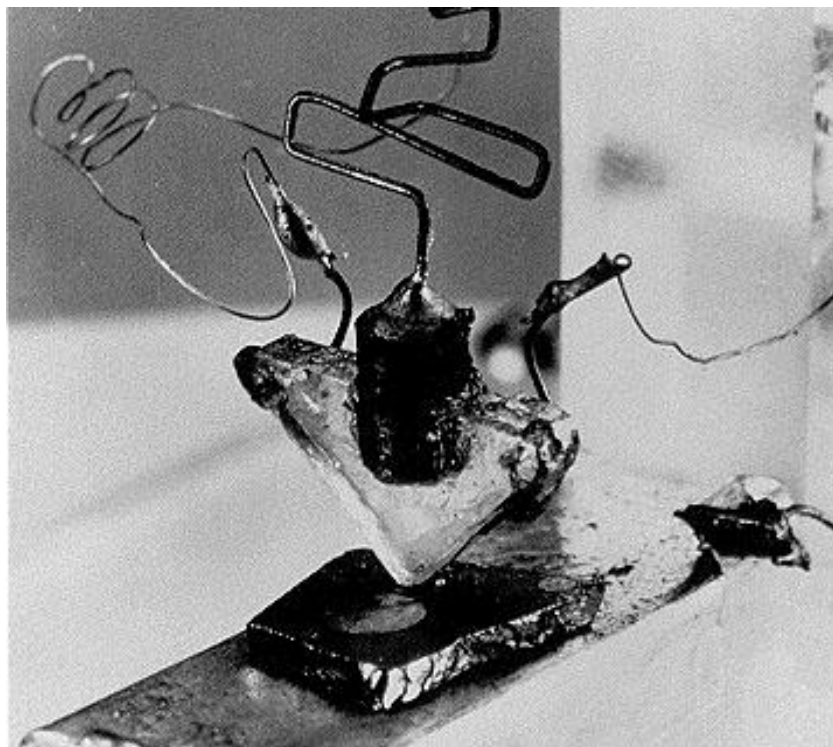


図 1.1 最初の点接触型トランジスタ^{1.1)}

その後、動作が不安定だった点接触型トランジスタを改良し接合型トランジスタが発明された。これらの点接触型トランジスタは現在ではバイポーラトランジスタと呼ばれるトランジスタの原型となっているものである。1959年には複数のトランジスタを小さな半導体基板上に形成して一つの機能素子とした集積回路（Integrated Circuit : IC）を米国 Texas Instruments 社の Jack Killby が開発した。この集積回路は大規模集積回路（Large Scale Integrated Circuit : LSI）へと発展していくことになる。トランジスタにはバイポーラトランジスタと呼ばれるトランジスタと MOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）とにわけられる。当初、米国 AT&T Bell 研究所の Walter Brattain, John Bardeen, William Bradford Shockley らのグループは MOSFET の開発に取り組んでいた。しかし、開発が思うように行かず、バイポーラトランジスタの開発を行うこととなった。実際に MOSFET を実用化したのは米国 Bell 研究所の Dawon Kahng, M.M. Atalla であり、1960 年のことである。MOSFET が実用化されるまではバイポーラトランジスタによる集積回路が開発されていたが、集積回路の製造がしやすいことから MOSFET による集積回路の製造が行われるようになり、現在の集積回路の基礎となった。1963 年には MOS（Metal Oxide Semiconductor）あるいは CMOS（Complementary MOS）IC によって大規模集積回路（Large Scale Integrated Circuit : LSI）が作られるようになった。1971 年に米国 Intel 社が半導体の集積化技術を高度化することによって 1k ビットのメモリと 4 ビットのデータを処理できるマイクロプロセッサを開発した。このように素子数数個から始まった IC は 1970 年代以降になると素子数が数千個以上の LSI へと発展した^{1.1)}。

ここでトランジスタの作動原理について説明する。トランジスタは既出の通りバイポーラトランジスタと MOSFET の二つに分けられる。まず初めにバイポーラトランジスタについて説明していく。図 1.2 に主な構造を示す。バイポーラトランジスタは三つパートに分けられる。それぞれをエミッタ、ベース、コレクタと呼んでいる。ベースに電流を流していないときエミッタ・コレクタ間に電圧を掛けても電流はほとんど流れない。ところがベース電極に電圧を加えてやるとベースが正に帯電するためエミッタから電子がベースに流れ込む。このようにベース電流を調整することによってコレクタ電流を大きく変化させることができる。

次に MOSFET について説明する．図 1.3 にその模式図を示す．MOSFET はソース，ゲート，ドレインと呼ばれる三つのパートを持っている．二つの n 型半導体の間に p 型半導体が挟まれた構造になっている．またゲート部に注目すると MOS の語源となる金属，酸化物，半導体という構造になっている．ゲート電極に電圧をかけないで，両端の電極にだけ電圧をかけた場合トランジスタには電流は流れない．これはトランジスタがオフになっている状態である．ゲート電極に電圧を掛けると p 型層の少数の伝導電子は上面に集まってくる．p 型シリコンウェハは絶縁体であるため，電流は流れないがゲート電極に電圧を掛けた場合 p 型シリコンウェハ上面に反転層と呼ばれる，電子の通り道ができ，電流が流れる．このようにゲート電極の電圧の有無によって電流の流れを制御できるようになっている^{1,2)}．

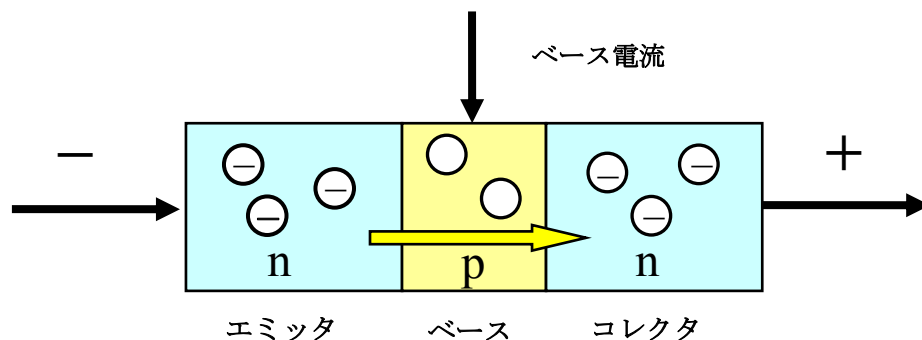


図 1.2 NPN 型のバイポーラトランジスタの模式図

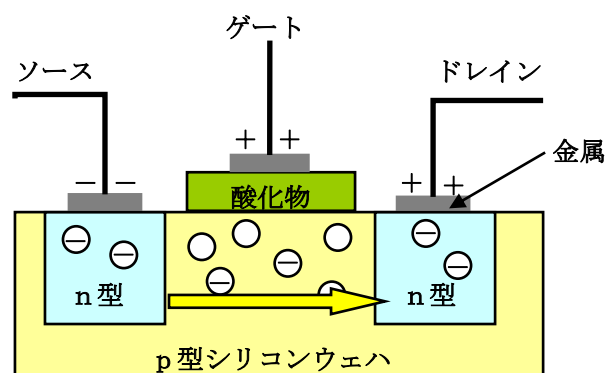


図 1.3 MOSFET の模式図

トランジスタがアメリカのベル研究所で開発されたのが 1947 年であり、60 年の間に、1 チップあたりのトランジスタ数が 10 億個となったことを考えると、その進歩は目覚ましい。米国 Intel 社の Dr.Gordon Moore は経験則として集積回路上のトランジスタ数は 18 ヶ月ごとに倍になるという Moore の法則^{1.3)}を提唱した(図 1.4)。Moore の法則は現在の半導体技術のロードマップの基礎となっており、その集積度もこの法則にしたがって増加している。

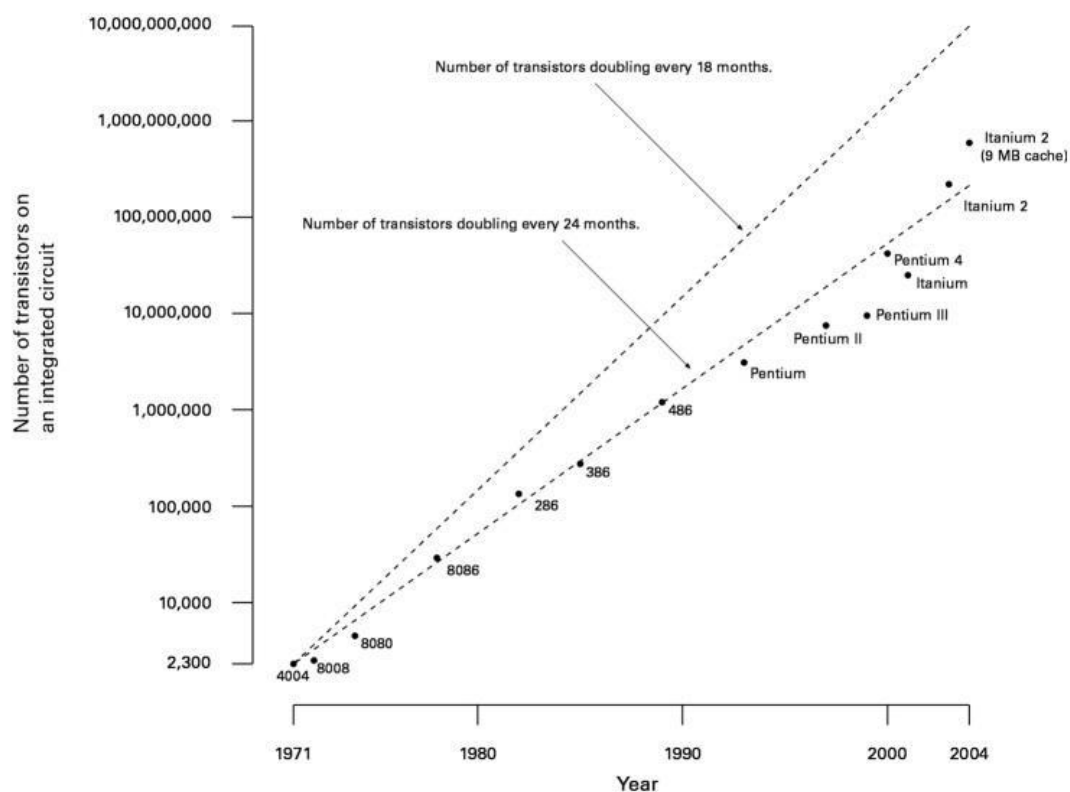


図 1.4 Moore の法則^{1.3)}

集積度を上げ性能を向上させる方法として用いられてきたのが微細化という方法である。LSI を構成するトランジスタを微細化することによって、1 チップ当たりのトランジスタ数は増加し、集積度は向上する。また、トランジスタ間に形成される配線を微細化することによって単純に配線の長さが短くなるため信号を速く送ることができ高速な動作が可能となる。高集積化と高性能化を実現するために現在では配線層を多層化する手法が用いられている。多層化を行う際に LSI のパターンを投影露光するリソグラフィ技術が用いられているが、微細化の進展とともに露光前のウェハ表面の平坦化処理を行う必要が出てきた。そこで初期の平坦化工程で用いられていた方法が(a)リフロー法、(b)エッチバック法、(c)リフトオフ法などである^{1,4)}。しかしながら、それらの手法にも長所、短所があり広く適用されるには至らなかった。そのような背景で登場したのが平坦化 CMP(Chemical Mechanical Polishing)技術である。CMP は化学的機械研磨と呼ばれウェハ表面を化学的作用と機械的作用の両方を用いて研磨により平坦化する手法である。遊離砥粒を含むスラリーと呼ばれる研磨液を使用する CMP 技術は当初はクリーンな環境で製造される半導体の製造現場への導入に大きな壁が存在したが、従来の平坦化法と比べて高い平坦化能力と歩留まりの向上が実現できるため短期間に広く使用されるようになった。

今後も集積度を向上させ高性能化を実現するために平坦化 CMP 技術は必要不可欠であると考えられる。それにともない平坦化 CMP 技術も高度化していく必要がある。しかしながら現状では CMP における材料除去プロセスはいまだに解明されておらず、体系化されているとは言えない。経験的な蓄積により、調整、制御することで加工精度を実現しているのが現状である。

本研究では未だ解明が進んでいない CMP プロセスにおける材料除去現象をより深く理解するために、研磨に最も影響のあるスラリー中の粒子とスラリーの流れに着目し、多層配線構造の下層で実施され、高い平坦化性能が求められる STI-CMP の対象物質である酸化膜(SiO_2)の CMP の材料除去メカニズムについて検討することを目的とした。

1.2 LSI の製造工程と平坦化技術

1.2.1 LSI の微細化と微細化による問題

半導体製造技術は驚異的な発展を遂げている。従来，超 LSI デバイスの集積度は MOSFET を微細化することにより，単位面積当たりの素子数を増やすことによって向上してきた。また MOSFET 微細化により，配線距離が短くなることによって電気信号の高速化が進み性能の向上がもたらされた。しかし，超 LSI デバイスの性能向上のための方法であった微細化にも限界があり，配線を微細化していくと配線遅延と呼ばれる電気信号の伝播遅延の問題が生じてきた。この配線遅延はチップ上のトランジスタが相互に配線され，寄生抵抗や寄生容量で決まる RC 時定数に関係する。この RC 時定数とは R（抵抗）と C（容量）の積で表わされる。微細化により配線の断面積が小さくなると配線抵抗 R は増大する。また微細化を行うことで配線間の間隔が狭くなると配線間がコンデンサーとなってしまい，その配線間容量 C が増大する。つまり RC 時定数が大きくなり電子の動きが乱れてしまうため配線における信号遅延が大きくなってしまふ。この問題に対応するため，配線金属に低抵抗の Cu（銅）を用い，層間絶縁膜としては low-k と呼ばれる低誘電率の材料を用い^{1,5)}問題解決を図ろうとしている。

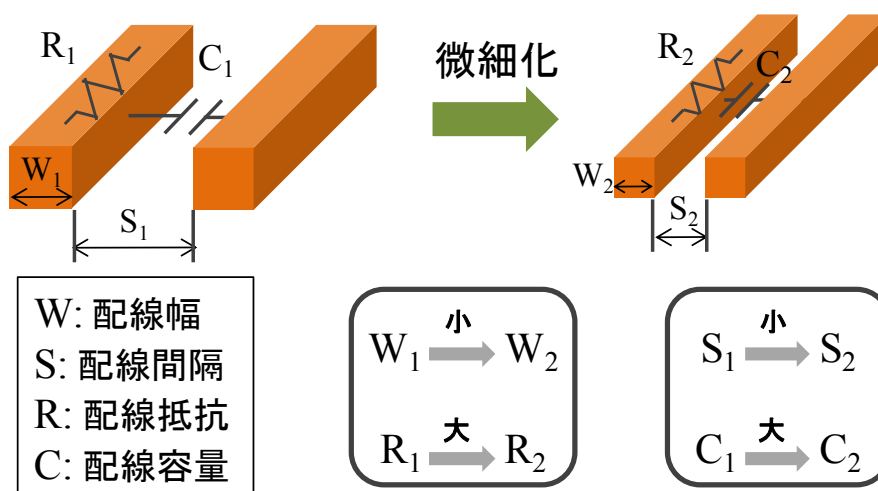


図 1.5 配線幅と配線抵抗，配線間隔と配線容量の関係

1.2.2 LSI の製造工程における平坦化技術

LSI の製造工程は大きく分けて前工程と後工程と呼ばれる工程に分けられる。前工程はシリコンウェハ上にトランジスタを形成しトランジスタ間を配線で結ぶまでの工程である。後工程はウェハ上に形成された LSI をダイシング、ボンディング、モールドイングという工程を行うことで、チップ状の製品にする工程である。前工程で作成された MPU デバイスの断面図を図 1.5^{1,6)}に示す。図 1.5 に示すように、多くの箇所で平坦化 CMP 技術が適用され、現在では主に STI 工程での STI-CMP、プラグ形成時の酸化膜/W-CMP、配線形成工程での ILD-CMP、Cu-CMP の 4 種の CMP 技術がある^{1,7)}。それぞれの工程について以下に述べていく。

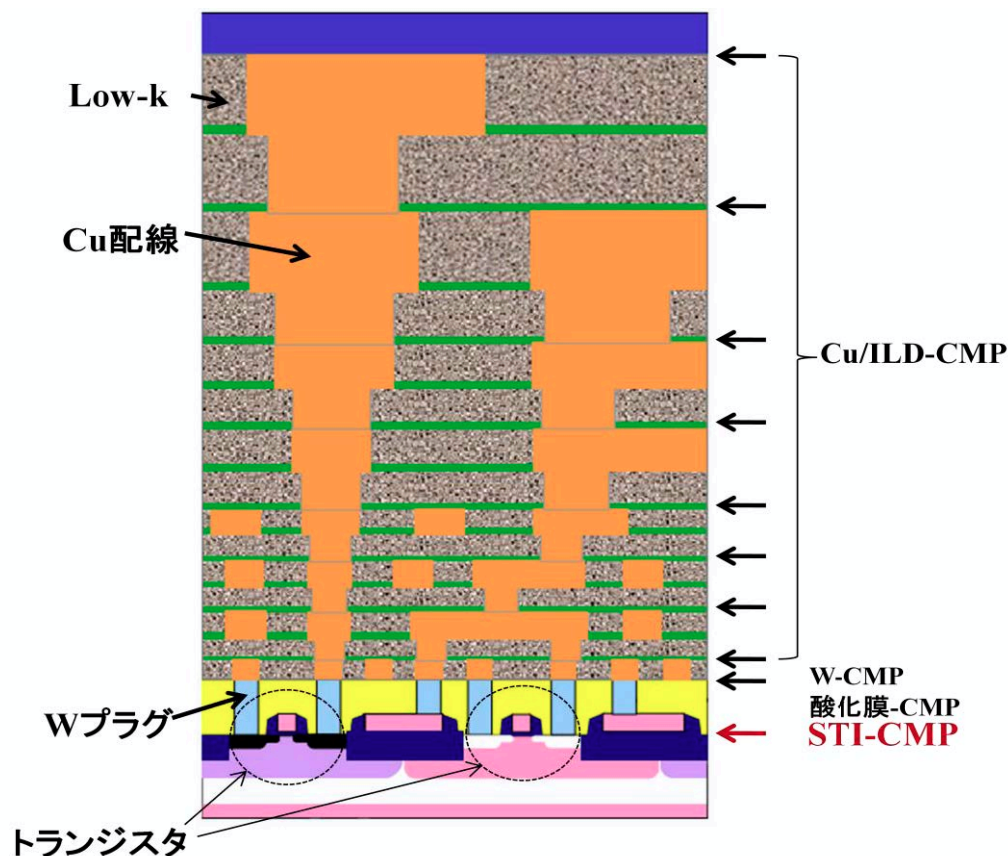


図 1.5 MPU デバイスの断面図

前工程は 2 つの工程に分けることができる。一つは FEOL(Front-End of Line)と呼ばれており、シリコンウェハ上にトランジスタを形成する工程である。も

う一つは BEOL(Back-End of Line)と呼ばれるトランジスタ形成後に配線層を形成する工程である^{1,8)}。FEOL では STI(Shallow Trench Isolation) と呼ばれる素子分離工程で平坦化技術が用いられる。図 1.6 に素子分離工程の概略を示す。素子分離工程はシリコンウェハ上に窒化膜，酸化膜を形成し露光によるパターンニングを行った後，エッチングにより素子分離溝を形成する。その素子分離溝に絶縁させるための酸化膜を形成し，最後にウェハ表面に形成された酸化膜の凹凸を平坦化 CMP 技術により平坦化するという工程である^{1,7)}。この素子分離工程は個々の素子が互いに電子のやり取りをしないようにするため，素子間を電氣的に分離させるための工程である。BEOL では配線形成工程で平坦化技術が用いられる。図 1.7 に Al 配線の形成工程を示す。配線金属を形成した後にレジストを塗布する。次にステッパーを使って露光を行いパターンニングする。パターンニングした形状に配線を形成するためエッチング処理を行い，アッシングによりレジストを除去する。その後，配線を絶縁させるために層間絶縁膜である酸化膜を形成し，最後に多層化のための平坦化 CMP を行う。この平坦化を ILD-CMP という。配線形成工程では他にもトランジスタと配線層を繋ぐ垂直プラグ形成のための W(Tungsten)-CMP やデュアルダマシン法と呼ばれる Cu 配線形成に用いられる Cu-CMP 等の平坦化処理が行われる。プラグ形成工程は Al 配線形成工程の配線金属を絶縁膜，層間絶縁膜を W に置き換えた工程である。Cu 配線形成工程を図 1.8^{1,4)}に示す。初めに Cu 配線を形成するために層間絶縁膜にビア用ホールと配線用溝を同時に形成し，Cu の拡散を防ぐためにバリアメタルを形成する。その後，Cu を鍍金法により埋め込み，余分な Cu の除去と平坦化を目的として CMP を行うことで配線を形成する。この工程を繰り返すことで多層配線構造を実現している。

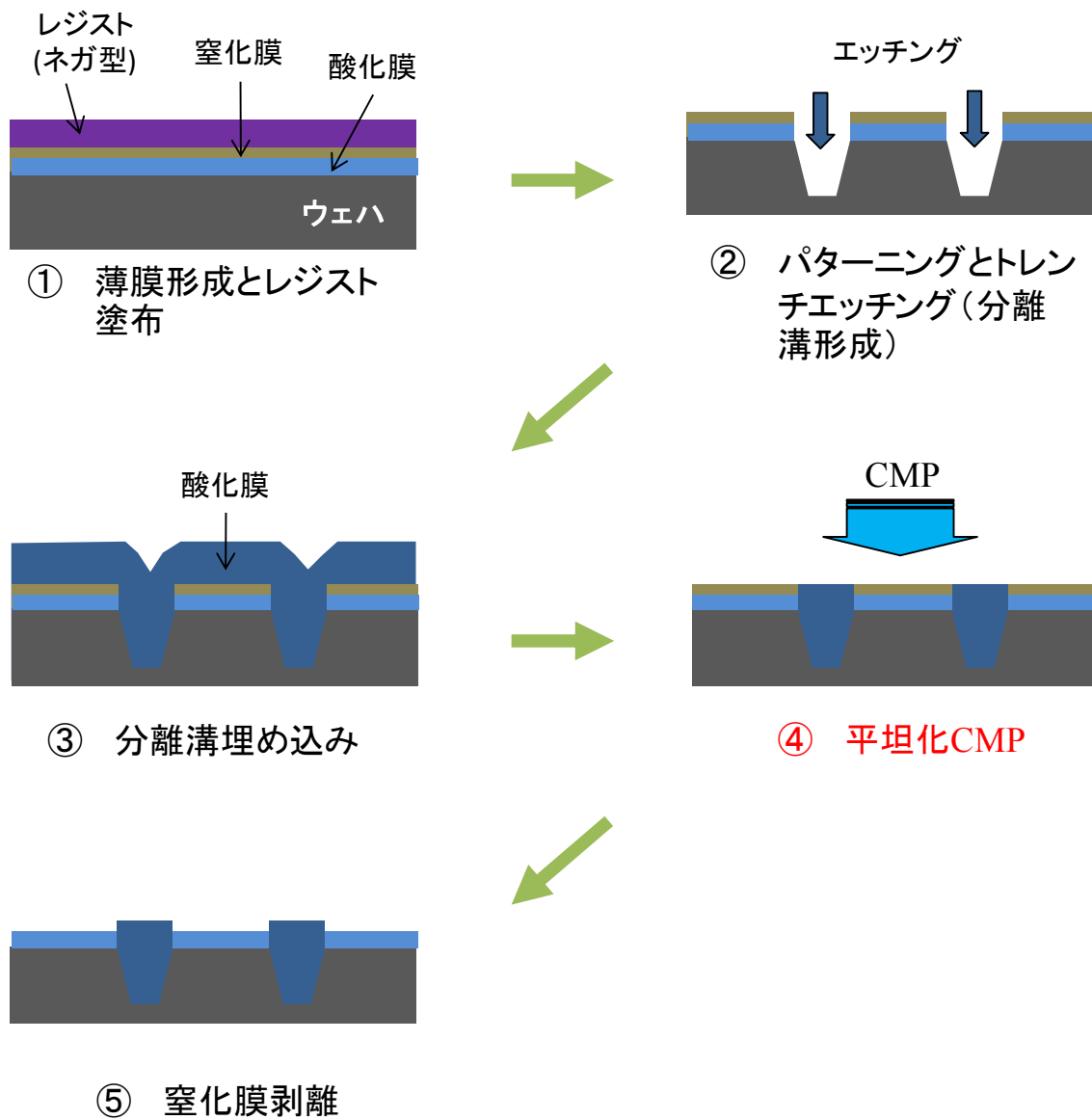


図 1.6 STI 工程の概略図

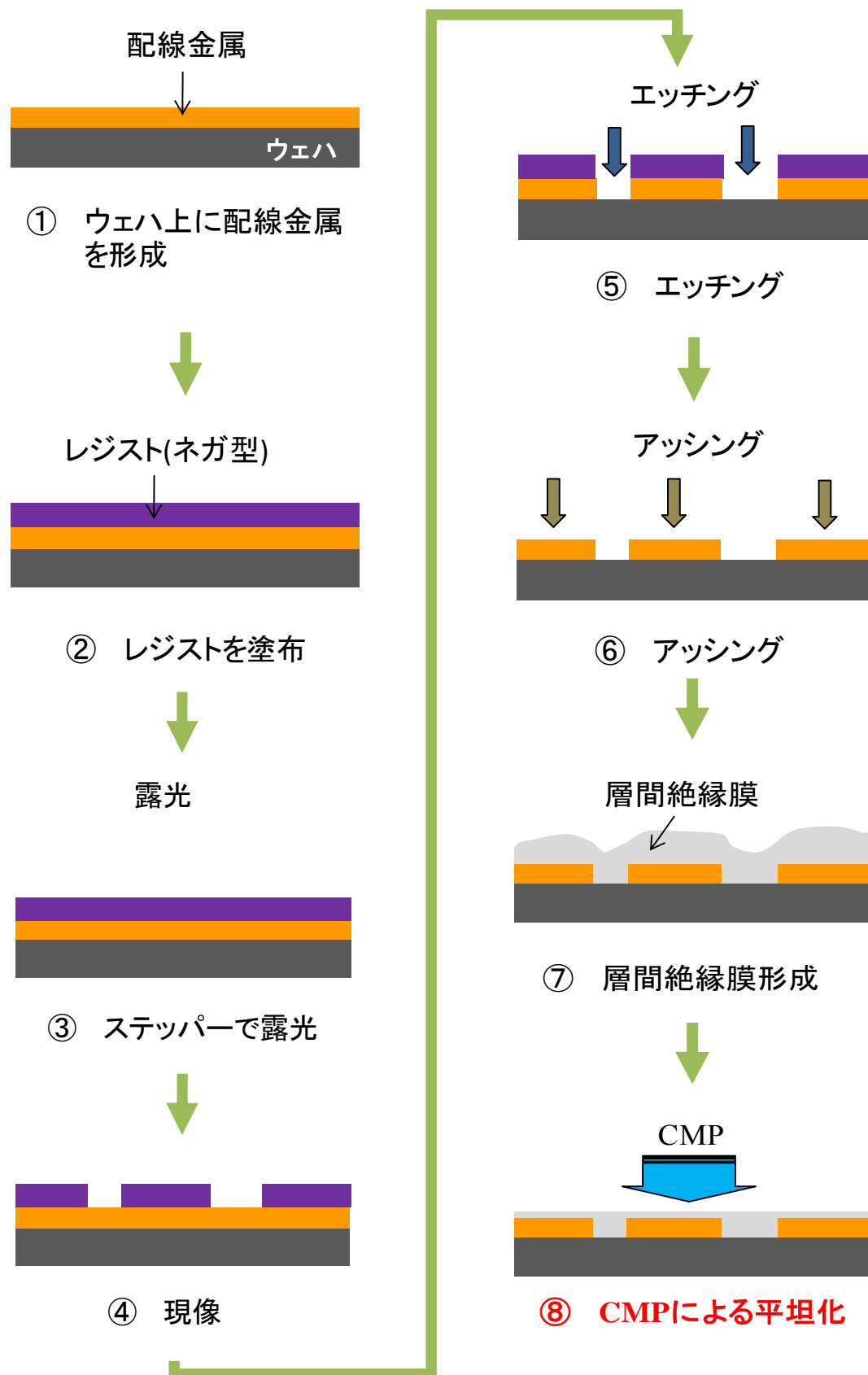


図 1.7 Al 配線形成工程

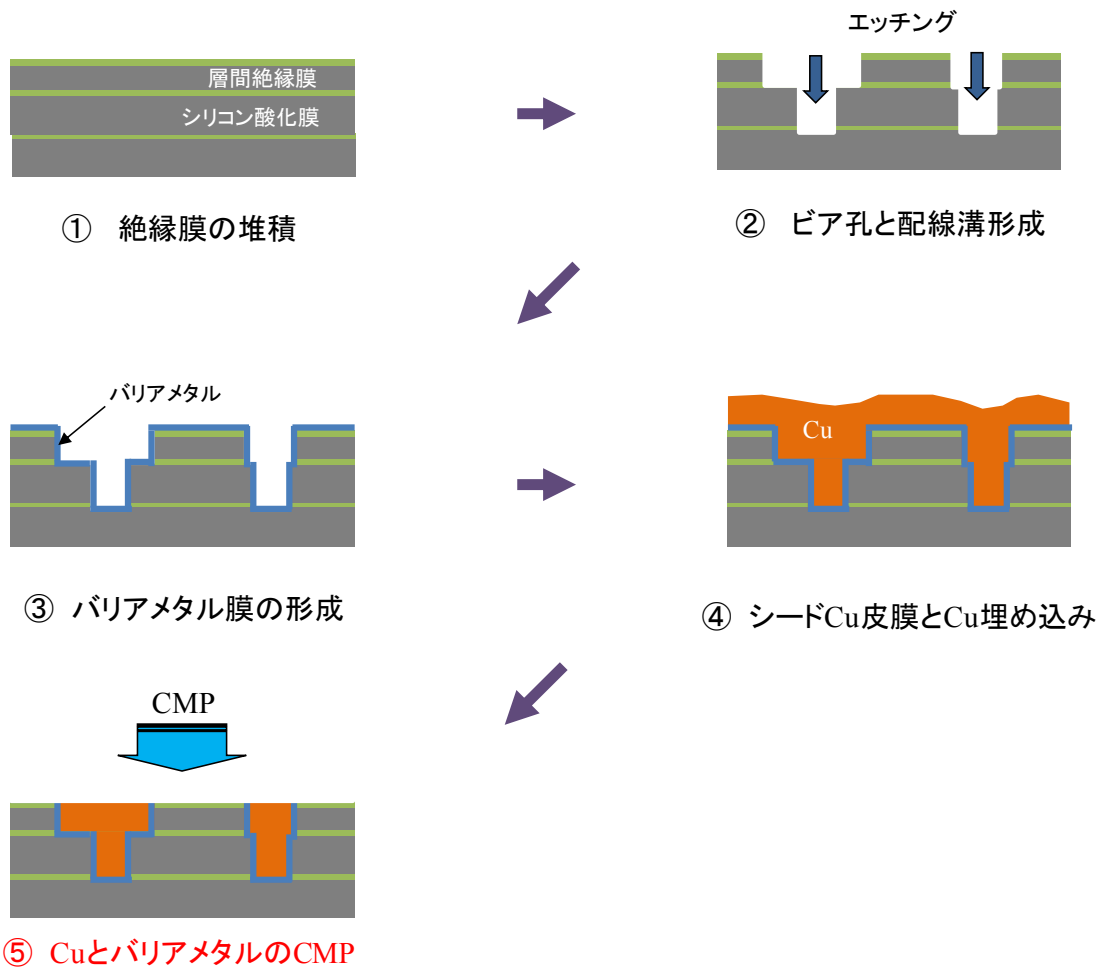


図 1.8 デュアルダマシン法による Cu 配線形成工程

1.2.3 平坦化技術の必要性

一般的にトランジスタが数千個/チップ以上になると，1 平面上で金属配線の全てを形成することが困難になる．また，チップサイズ増大とともにセル相互を接続する配線が長くなり，配線金属を通る電気信号の伝播遅延が非常に大きくなる．そこで，配線を多層化することによってその問題の解決を図ろうとしている．図 1.9 に平坦化前と平坦化後の多層配線構造を示す．微細化を図りながら多層配線を達成しようとするとき，薄膜を形成する際に段差形状に対する膜被覆性（ステップカバレッジ）が悪くなる．したがって，多層配線を形成する際に，この膜被覆性を改善するためには，層を重ねていく工程でデバイスが形成されたウェハ表面の平坦化处理をしなければならない．一方デバイス化プロセスの微細化が進むとフォトリソグラフィにおける解像度と焦点深度が両立できないところに近づき，表面の凹部と凸部を同時に焦点合わせすることが困難になる．図 1.10 に焦点深度とウェハ表面の凹凸の関係を示す．投影露光方式における解像度 R と焦点深度 $\text{DOF}(\text{Depth Of Focus})$ は，露光に用いる光の波長を λ ，レンズの明るさを表す開口数を NA とすると

$$R = k_1 \cdot \frac{\lambda}{\text{NA}}$$

$$\text{DOF} = k_2 \cdot \frac{\lambda}{\text{NA}^2}$$

(k_1, k_2 はプロセス条件や露光光学系による係数)

という関係がある．これは **Rayleigh** の式と呼ばれる．つまり，解像度を上げるためには，短波長の光を使うか開口数 NA のより大きな光学系を使用する必要がある．しかし， λ を小さく NA を大きくすると焦点深度が浅くなり凹凸のある表面に対して露光が困難となる．超 LSI における配線の微細化のためには，層間絶縁膜の表面が焦点深度よりも平坦でなければ工程を進めることはできない．つまり，ウェハのデバイス化表面の凹凸を取り除く平坦化处理の必要性とは，配線遅延に対処すべく多層配線構造を実現する平坦性の確保と微細化のために浅くなってしまふフォトリソグラフィにおける投影レンズの焦点深度に対

応するためである^{1.4)}。また、ウェハ表面の凹凸を低減することで配線のショートや形成不良を防ぎ、歩留まりを向上させることができることも平坦化処理を行う理由である。

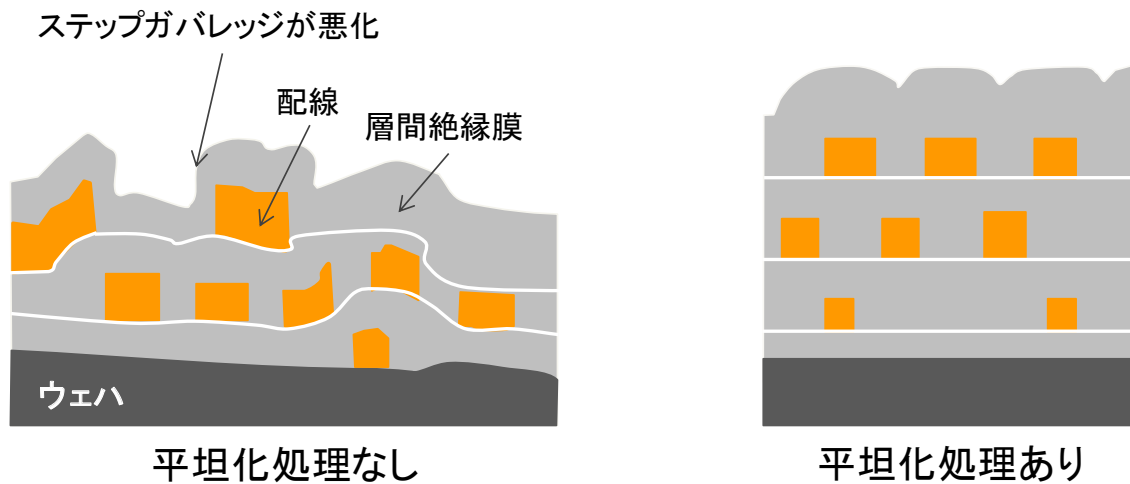


図 1.9 平坦化処理を行わない場合の配線構造の断面図と平坦化処理を行ったときの配線構造の断面図

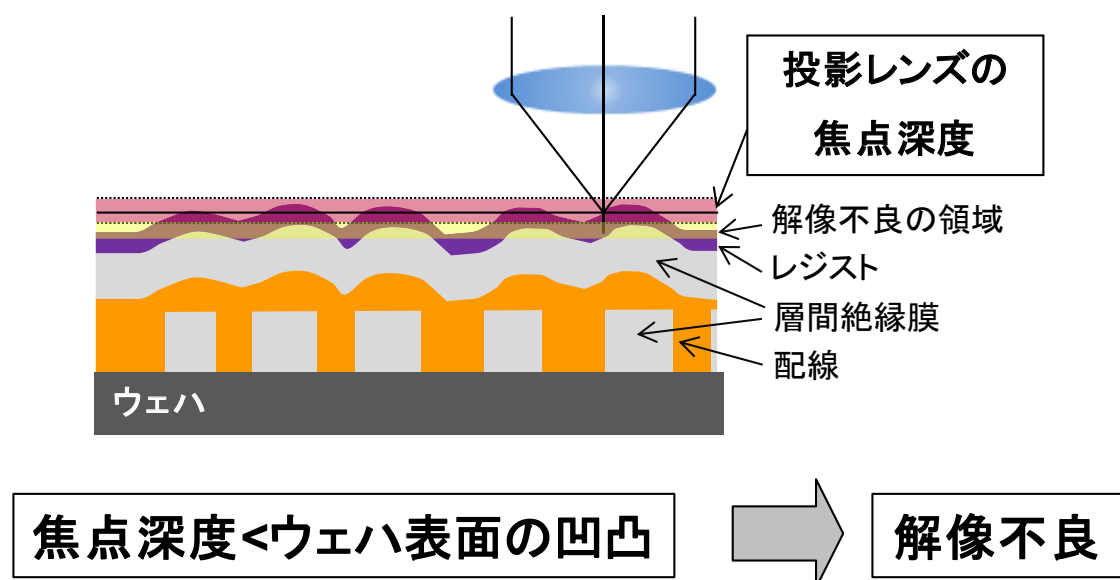


図 1.10 焦点深度とウェハ表面の凹凸との関係

1.3 本論文の構成

本論文では全体で8章から成り、以下に示す構成を取っている。

第1章は緒論であり、本研究の背景としてLSIの歴史的な変遷とLSIの微細化と高集積化に伴う、ウェハ表面の平坦化技術の必要性について述べた。

第2章ではCMP技術の概要とCMP技術の課題について述べ、現在考えられているCMPプロセスにおける材料除去モデルと材料除去メカニズムの考え方を示した。その後、従来の材料除去モデルと材料除去メカニズムの問題点と本研究の必要性を示し、研究の目的を述べた。

第3章では、マクロな材料除去現象を考えるために必要なスラリーの流れの可視化実験を行い、スラリーの流れと研磨量との関係を考察した。

第4章では、スラリー中の研磨粒子がどのように分布しているのかを原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope: AFM)を使って観察した。

第5章では、新たな視点で材料除去メカニズムを考えるにあたって分子動力学を用いたシミュレーションモデルと化学的な考え方、そしてトライボロジーの分野における摩耗の現象モデルについて述べ、新たな材料除去メカニズムを理論的に考察した。

第6章では、ミクロな材料除去現象を考えるためにAFMの探針先端をスラリー中の研磨粒子と見做して実験を行い、ナノオーダーでのスラリー中の研磨粒子の材料除去現象を観察した。

第7章では、研磨前と研磨後のスラリー中の研磨粒子を観察し、実際のCMP中で粒子の形状の変化が発生しているか考察した。また、凝着除去を促進すると考えられるパッド表面に微小な凹凸のあるポリシングパッドを使用して研磨

実験を行い、凝着除去現象の効果が増大するか検討した。

第8章では、研究成果を要約し、本研究のまとめとした。

参考文献

- 1.1) HOT WIRED JAPAN : 「ムーアの法則」を覆す半導体新技術, <http://hotwired.goo.ne.jp/news/technology/story/20060227305.html>
- 1.2) ナノエレクトロニクス：トランジスタ, <http://www.s-graphics.co.jp/nanoelectronics/kaitai/transistor/index.htm>
- 1.3) Moore, G., “Cramming more components onto integrated circuits”, *Electronics*, vol.38, no.8, April 19, 1965.
- 1.4) 木村景一：光放射圧制御 CMP 加工に関する基礎的研究，大阪大学博士論文 (2002)
- 1.5) 土肥俊郎 編：詳説半導体 CMP 技術，工業調査会 (2001)
- 1.6) 2007 ITRS Figure. INTC2
- 1.7) 木下正治：半導体デバイスプロセスにおける CMP，精密工学会誌，Vol.71 No.7, 2005.
- 1.8) 菊池正典：半導体のすべて，日本実業出版社 (2006)

第2章 平坦化 CMP 技術

2.1 CMP 技術の概要

長い加工の歴史の中で、様々なポリシング法が提案されてきた。特に光学分野で用いられるポリシングは切削加工や研削加工が困難だったガラスなどの鏡面仕上げの方法として一般的に知られている。光学材料の加工メカニズムの検討が進められ、鏡面加工の高度化や超精密化の重要性が認知されると共に色々な超精密ポリシング法が生み出された。この超精密ポリシング法は **CMP** の基礎となったといえる。ガラスなど硬脆材料の光学ポリシングについては、従来の金属材料のポリシングの挙動と同様に

- ① 塑性流動によって凸部が凹部に流れ込んで平滑化
- ② ポリシング時に働く化学的作用がそれを助長
- ③ 機械的に除去

などといった説明が行われてきた。これが研磨による材料除去の考え方の基本となり、現在では様々な砥粒や加工液を使用して、特徴あるポリシング法が提案されている。加工物材質やスラリー、パッドなどの加工用資材の組み合わせによって様々な機械的作用や化学的作用がもたらされ、それらの特徴を生かした化学・機械的複合ポリシングが考案されている。その典型例が **CMP** や **MCP** (**Mechanical Chemical Polishing**) である。**CMP** は化学的作用を多く含んだものであり、**MCP** は機械的作用に重点を置いた研磨法である。

デバイスを製作するにあたってポリシング時に形成される加工変質層をデバイス機能に利用することは極めて少なく、加工変質層が皆無の無擾乱鏡面状態に仕上げることが要求されている。ガラスレンズなどの光学ポリシングでは、ピッチ（パッド）とベンガラ（ Fe_2O_3 ）や酸化セリウム（ CeO_2 ）粉末などを水に

分散させたスラリーを用いると、表面粗さ 5nmRz 前後の高品質の鏡面仕上げが可能とされてきた。しかし、シリコンウェハにこの光学製品の加工に使用されるポリシングを適用しても、微細なスクラッチが検出されるなどシリコン基板の表面下に素子を形成するプレーナ技術に適用できなかった。シリコンウェハのメカノケミカルポリシングでは、機械的作用をできるだけ小さく抑えるため組成と pH 値を調整した加工液の中に微細な SiO_2 粒子をコロイド上に分散させたスラリーと、微細な細孔で覆われた滑らかなポリシングパッドなどが使用される。加工物としてのシリコンウェハは大口径であり、スラリーが少しだけ粘度を有するので、相対運動で発生するハイドロプレーン現象によってウェハとパッドの間にスラリー層が形成される。この状態で加工する際に圧力を掛けることで温度上昇を伴い、軟質パッド凸部の軽微な擦過によってシリコン表面に水和膜の生成を促す。そして剥離・除去の際に、高品質の鏡面仕上げが進むものと解釈されている^{2,1)}。その様子を模式的に示したものが図 2.1 である。

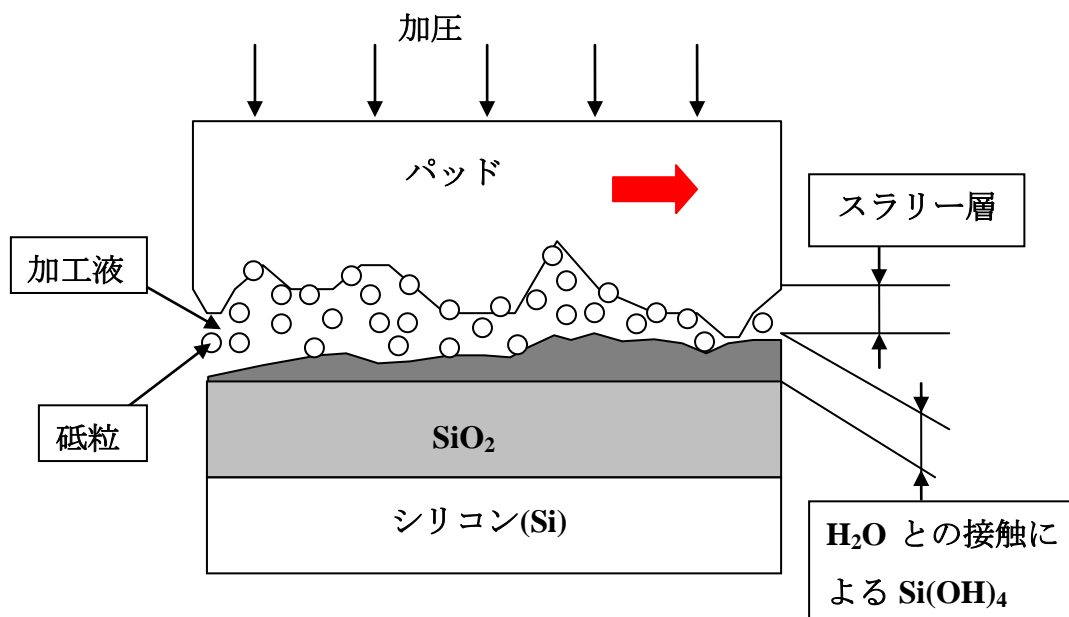


図 2.1 酸化膜の CMP メカニズムの模式

図 2.2 はプラテン・ロータリ型 CMP 装置の例である^{2.2)}。この図を用いてポリシング機構部の基本構成を説明する。上部にウェハを保持しながら回転と加圧を与えるポリシングヘッド部、それに対向する形式でポリシングパッドが貼付されたプラテン駆動機構がある。ポリシングヘッド部はデバイス化ウェハの平坦化 CMP では CMP 後の表面の平坦度が数十 nm 以下であることが求められる。そのため、ウェハをいかに均一に加圧するかが重要であるといわれている。機構的にポリシングヘッド部はウェハの裏面側の均一加圧部位、ウェハの外れ防止リング、ウェハ移送用のチャックの三つほどの部位から構成される。ウェハの裏面側の均一加圧部位は加工精度に関わる部分であり極めて重要である。プラテン駆動機構に求められるのは、定盤の平面精度であり、加工中の温度上昇による熱変形を抑えるための材料選定と回転機構の考慮が必要である。これらの高精度ポリシングにおける回転駆動機構では、ウェハとパッドの間の相對運動と軌跡密度の均一化、加工時の振動抑制も重要である。そのためベルトや歯車を用いないダイレクト駆動方式が導入されることが多い。

上記以外の構成としてはポリシングパッドのコンディショニング機構、スラリー供給機構などで構成される。ポリシングパッドのコンディショニング機構はパッドの加工能力の維持や安定した一定の加工特性を得るために重要である。パッドのコンディショニングはパッド表面の微細孔に残る加工屑の除去や、加工によって潰れてしまったパッド表面の凹凸を初期状態にすることであり、その方法としてはダイヤモンド砥石を利用してパッド表面層を削り取る方法^{2.3)}や、超音波を与え高圧水をかけてコンディショニングを行う方法^{2.4)}などがある。スラリー供給機構は適切な量のスラリーを安定して供給することが求められる。安定した供給ができない場合、スラリー中の粒子が凝集してマイクロスクラッチなどの加工欠陥を引き起こす可能性があり、加工品質に影響を与えるといわれている。

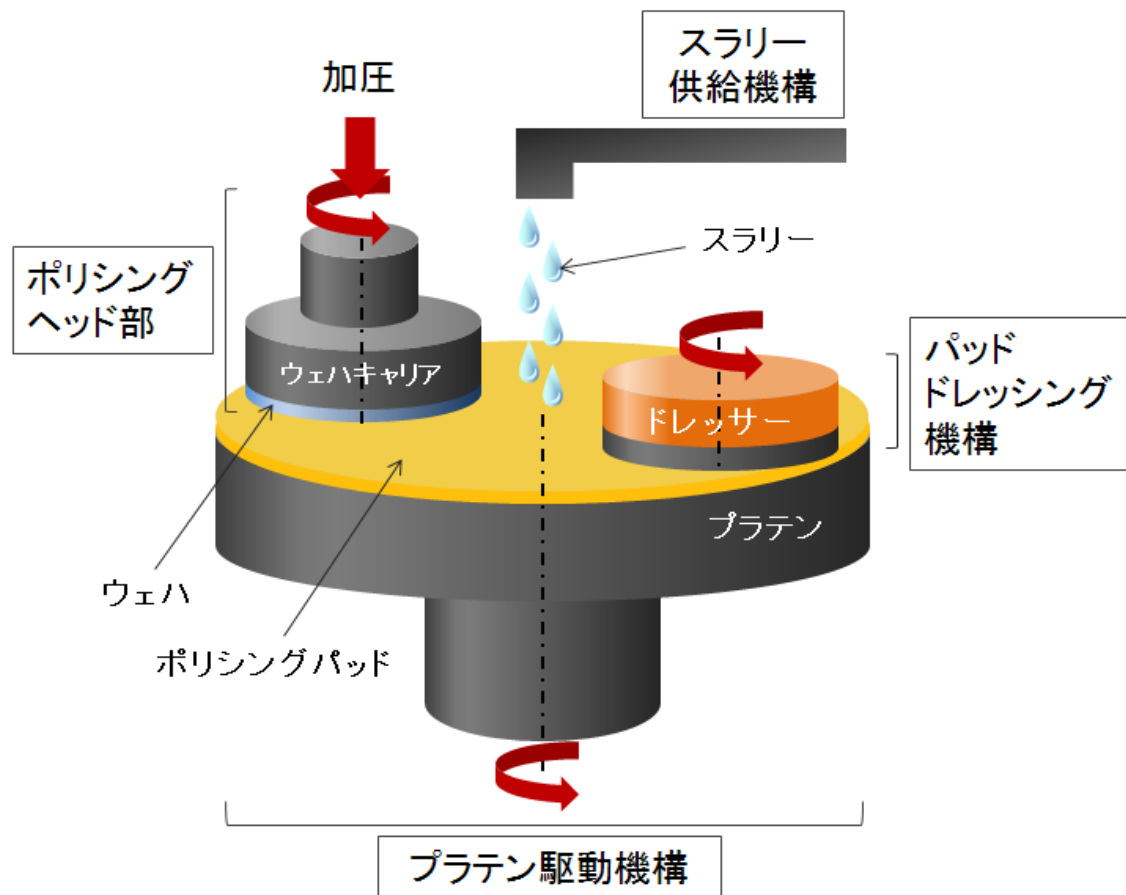


図 2.2 プラテン・ロータリ型 CMP 装置の模式図

2.2 CMP 技術における課題

材料除去メカニズムの理解は平坦化 CMP 技術の課題を解決するための基礎となる。そこで、現状での平坦化 CMP 技術の課題について述べる。平坦化 CMP 技術によるウェハ表面の平坦化は、理想的には凸部から順次優先的に除去していき、平滑かつ平坦化することが望まれる。平坦化するウェハ表面は、デバイス形成面であるため加工欠陥や汚染物質を付着させてはいけない。これらの条件を大口径ウェハ全面にわたって実現するとともに、実際の生産を考慮して低コスト化と高スループット化を満足するような加工を行わなければならない。以下に、平坦化するにあたって要求される項目について述べる。

①大小疎密のある微細凹凸の平滑，平坦化加工

デバイス化途中のウェハは、基板とするシリコンウェハの TTV(Total Thickness Variation)の異なりや、反りが存在するなど品質にばらつきがある。通常使用されるベアシリコンウェハは、TTV が数 μm と大きいものから 1 μm 前後である。デバイスが形成されたウェハの反りは 50～100 μm 前後である。このことを考慮したうえで、デバイスパターン寸法の大小粗密のある微細な凸部を優先的に除去しなければならない。デバイスの種類あるいは加工対象によって異なるが、加工量(加工マージン)は概略 1～0.5 μm しかなく、この範囲内でパターンの凹部を加工することなく均一にウェハ全面の段差を解消しなければならない。いずれにしても、加工面の基準はデバイス形成面であることに留意して、表面基準加工法を定める必要がある。もちろん、加工面に内部クラックやひずみが生じていて機能上の問題も生ずる可能性があるため、限りなく無擾乱鏡面にする。加工装置における運動機構、均一加工方法、適切なパッドとスラリーなどの選定が必要とされている。

②加工面の無汚染化

スラリーを使用するポリッシングでは、一般的にスラリーやパッドが汚染源となる。特に金属イオンは、デバイスの電気的特性に多大な影響を及ぼす。これらの汚染が発生・残存しないポリッシング資材・条件を採用することが基本であるが、加工後の精密清浄方法と合わせて清浄化が可能な加工条件を設定しなければならない。そのため、スラリーなどに含まれる組成分の残存を考慮した上

で、ゼータポテンシャルが同符号になるような洗浄条件を適用する。また、ドライアウトが原則であるので、ウェハ表面に残存する不純物やパーティクルを除去して直ちに乾燥する。

③加工終点

あくまでも CMP における加工の基準面は、デバイス化ウェハの表面であって、その表面の凸部からウェハ全面を均一に微量除去する。その加工すべき所定量（ $\sim 1\mu\text{m}$ ）で加工を終了させ、ウェハ内の残存膜厚バラツキを高精度（たとえば $\pm 3\%$ 以内）に仕上げなければならない。したがって、加工終点を確実に決めることが必須となる。

現状では、加工中計測技術が進歩してきたことは事実であるが、加工終点を検知する決定的加工中計測には至っていないため、デバイス品種に合わせ事前に除去量に見合う加工時間を決めて、加工時間でコントロールするのが主流ともいえる。そのため、再現性のある加工条件、技術を確立しなければならず、加工用のパッドのコンディショニングを含めて、パッドやスラリーの最適化が必要である。さらに、高分解能の加工中計測法の確立も求められている。

④スループットの向上

CMP システムは半導体製造装置の一つとして認知されなくてはならない装置の一つである。デバイス化プロセスの流れの中で CMP 工程が律速になることは生産にかかる時間が増大する。目安として、ステッパーのスループットに見合うくらい、もしくはそれ以上の生産性にすべく、低コスト化と合わせて高い加工能率を確保する必要がある。

⑤大口径ウェハへの対応

これまでは $\phi 8''$ ウェハ対応が一般的であった。現在、 $\phi 12''$ ウェハが主流となり $\phi 12''$ ウェハ対応のプロセスを導入する方向にある。さらに将来的には $\phi 18''$ ウェハ対応のプロセスの導入を考えておく必要がある。特に大口径化ウェハの現状の面接触式の CMP で注意すべきことは、ウェハ中心と周辺ではスラリーの入り方、作用あるいは蓄熱など状況が異なることである。そのため、CMP における運動機構などの工夫が必要となる。

⑥加工欠陥の減少

超 LSI デバイスの種類によって CMP の対象材料は、層間絶縁膜あるいは埋込

絶縁膜などのための SiO_2 , 配線あるいは各配線層の接続用のメタル (Cu や Al, W), メタルの拡散を防止するためのバリアメタル (Ta, TaN, TiN, WN など), トレンチ型キャパシタ形成用のポリ Si, 加工のストッパあるいは絶縁膜などのための Si_3N_4 などと多種多様である. その上, 所定の加工マージン内で微小凹凸のない, つまり段差のないように平坦化すると同時に, 加工欠陥のない高品位に加工することが絶対条件である. パターン付きのデバイスウェハを加工する場合, 様々な加工欠陥の発生が予想される. 図 2.3 はメタルの CMP を施した時に発生する加工欠陥の例で, シンニング, リセスとエロージョン, ディッシング, マイクロスクラッチ, そしてキーホールを模式化したものである^{2,5)}. これらの加工欠陥の発生原因は, 以下に列挙したように, 過剰な加工, スラリーとパッドに関わる物が多い. 加工条件の適正化を図り, 加工欠陥のない加工面を得て, プラナリティとユニフォームティを確保しなければならない.

シンニング

- ・ 過剰な加工, メタル/酸化膜の選択比, 平坦化条件

リセス・エロージョン

- ・ 過剰な加工, 軟質パッド, メタル/酸化膜の選択比, 平坦化条件

ディッシング

- ・ 硬質パッド, 粗大粒子, スラリーの凝集

マイクロスクラッチ

- ・ 硬質パッド, 粗大粒子, スラリーの凝集

キーホール

- ・ メタル堆積の不良, 高エッチング性スラリー, 異常エッチング, 加工温度上昇

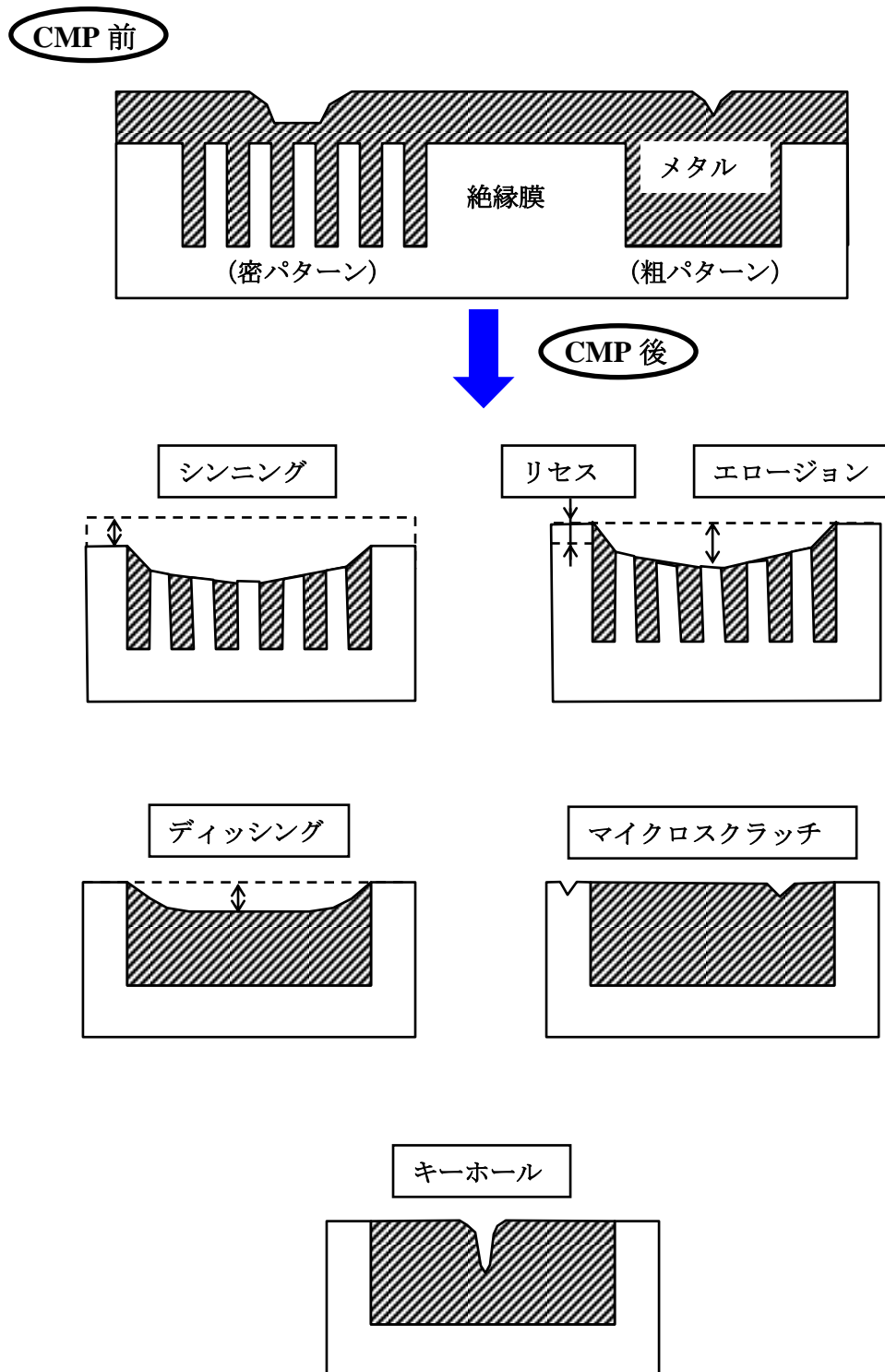


図 2.3 メタル CMP で見られる典型的な加工欠陥・現象

2.3 CMP プロセスにおける材料除去メカニズムとモデル

CMP による平坦化のプロセスにおいては、ウェハの平坦度、ウェハ上に形成されたデバイスパターンの寸法、形状、ウェハと接触するパッドやスラリーを介した研磨条件などが複雑に融合している。CMP プロセスの材料除去機構を理解することは、プロセスの最適化、ウェハ品質の向上、CoO(Cost of Ownership)や CoC(Cost of Consumables)の最小化、平坦化による最終形状の予測に大きく寄与する。CMP による平坦化のプロセスには様々なパラメータが複雑に絡み合っているため、全ての因子を網羅したプロセスを統一的にモデル化することは難しい。一般的に CMP プロセスをモデル化する場合、それぞれ要素ごとに分けて考えることが多い。

2.3.1 Preston の式

研磨における材料除去量を数式化した Preston^{2,6)}の式は次のように表される。

$$RR=k \cdot P \cdot v$$

ここで RR は研磨材料除去速度、 P は研磨圧力、 v はウェハの相対速度、 k は Preston 係数である。この式はガラスを研磨することによって経験的に導き出された実験式であり、単純な形で表され、理解されやすいという特徴を持っているため広く適用されている。また CMP において対象物が SiO_2 で形成される絶縁膜が主流であったため、この Preston の式が有効であるという考えから現在の材料除去モデルのベースとなっている。

2.3.2 泉谷ら, Oliver らの材料除去メカニズム

泉谷ら^{2.7)}はガラスのポリシングのメカニズムを実験的に考察し, SiO_2 の表面はスラリー中に含まれるアルカリ成分によって削られやすい水和物が形成され, この水和物がシリカ粒子によって削り取られるというモデルを示した.

Oliver ら^{2.8)}はパッド表面の粗さと研磨レートとの関係を調べ, 図 2.4 に示すようなパッド表面の微小な凹凸であるアスペリティによって研磨粒子がウェハに押し付けられるというモデルを示した.

両者のモデルはスラリー中の研磨粒子によってウェハ表面を削り取る現象論モデルである.

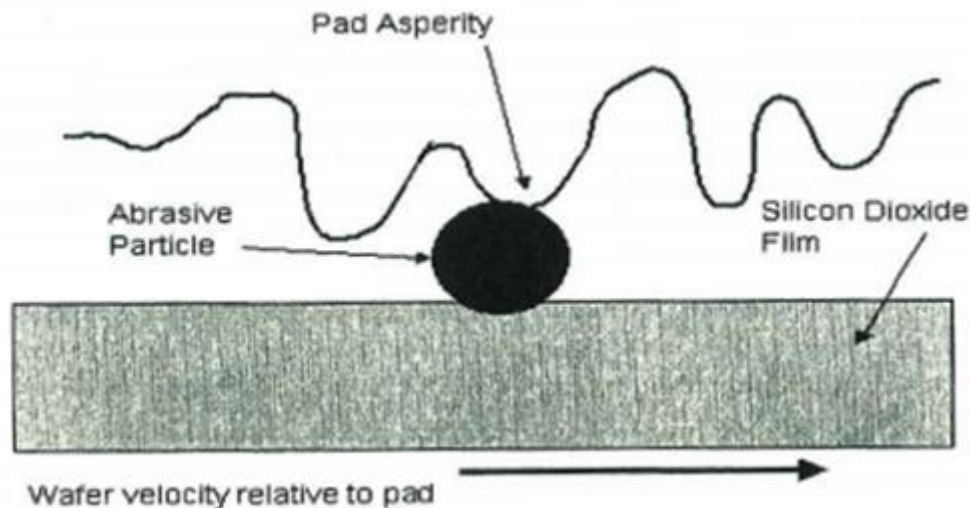


図 2.4 CMP におけるパッドの微小凹凸による研磨粒子の接触モデル

泉谷ら，Oliver らのモデルを統合した図 2.5 のような材料除去モデルが CMP プロセスにおける材料除去の主要因であると考えられている^{2,9)}．スラリーの化学的作用はウェハ表面に作用し，削り易い材質へと変化させる．そしてスラリー中の研磨粒子はパッドによってウェハ表面に押し付けられ，削り取る作用により材料除去が進行していくと考えている．

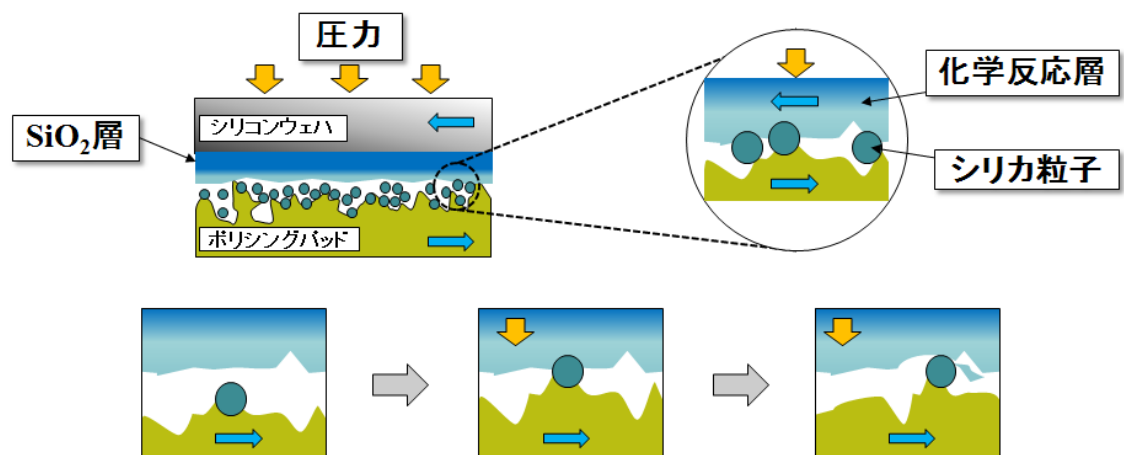


図 2.5 研磨粒子による切り込み現象による材料除去モデル

2.3.3 Shi のモデル

Shi^{2,10)}のモデルはパッドをソフトパッドに限定してモデル化を行っている。その理由はソフトパッドの場合、スラリー中に存在する研磨粒子とウェハの接触面積がどの研磨粒子の場合でも圧力に関係なく同じと見なすことが出来るからである。圧力が大きくなるとき、パッドとウェハの接触面が増え接触する研磨粒子数が増加する。また材料除去速度は研磨粒子一つの除去速度と研磨粒子数の積より全体の除去速度が求められているため導きだされる式は

$$RR=N(P) \times RR_1$$

N は接触している研磨粒子の数を表し、圧力を変数としている。このとき RR_1 は圧力 P 、ウェハの相対速度 V の積に比例する。 $N(P)$ の P の値と RR_1 の P の値を比較すると RR_1 の P の値は $N(P)$ の P の値に比べて非常に小さいので無視することが出来る。よって

$$RR \propto N(P)V$$

と考えられる。 Aa をウェハとパッドが接触している面積とすると $N(P)$ はヘルツの接触理論より導き出される関係式

$$N(P) \propto Aa \propto P^{2/3}$$

より以下の式が導き出される。

$$RR=k \cdot P^{2/3} \cdot v$$

ここで RR は研磨除去速度、 k は係数、 P は研磨圧力、 v はウェハの相対速度である。

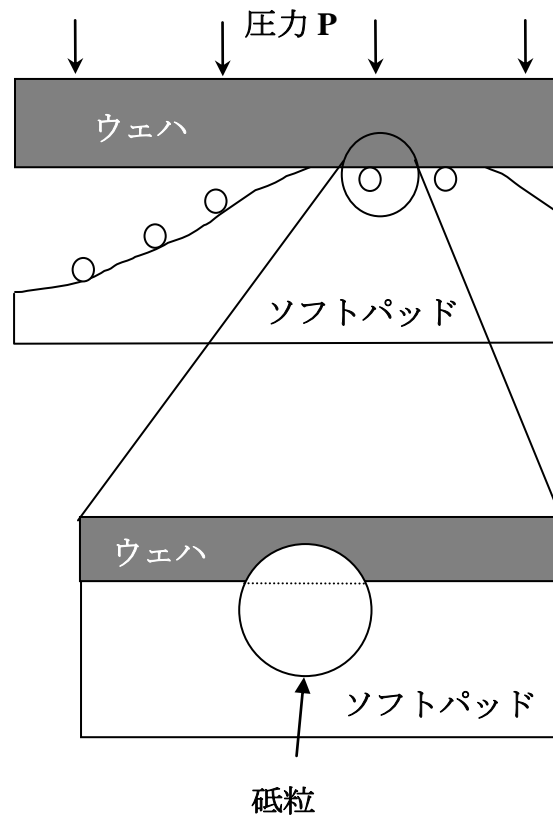


図 2.6 Shi によるモデル化の模式図

2.3.4 Luo のモデル

Luo^{2,11)}のモデルでは，スラリーの流体的な作用による研磨粒子の材料除去は考慮せず，パッドとウェハの間に存在する研磨粒子の接触によって材料除去が行われると考えている．またパッドはハードパッドに限定している．一つの研磨粒子の接触を考え，その接触面積を求めることによって研磨粒子一個あたりの材料除去量を決定しており，そこから全体の除去量を研磨粒子の総数との積により求めている．よって全体の材料除去量は以下のように考えている．

$$MRR_{mass} = \rho_w N \overline{Vol}_{removed} \quad (1)$$

このとき MRR_{mass} : 全体の材料除去量， ρ_w : ウェハ密度， N : 接触している研磨粒子の総数， $\overline{Vol}_{removed}$: 研磨粒子一つあたりの除去量である．

このとき N の値は

$$N = n \left(\Phi \left(\frac{x_{max} - x_{avg}}{\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{x_{max} - \Delta - x_{avg}}{\sigma} \right) \right) \\ = n \left[1 - \Phi \left[3 - \frac{0.25 \times \left(\frac{4}{3} \right)^{2/3} (x_{avg} + 3\sigma) \left(\frac{1}{H_p} + \frac{2}{H_w} \right) E_p^{2/3}}{\sigma b_1} p_0^{1/3} \right] \right] \quad (2)$$

と表している．これは図 2.7 のように粒度分布が正規分布であると考えて N を導き出している．

図 2.8 は $\overline{Vol}_{removed}$ を図示したものであり．このとき a_1 は接触半径を表し，

$$a_1 = \sqrt{2F / (\pi H_w)} \quad (3)$$

となる．

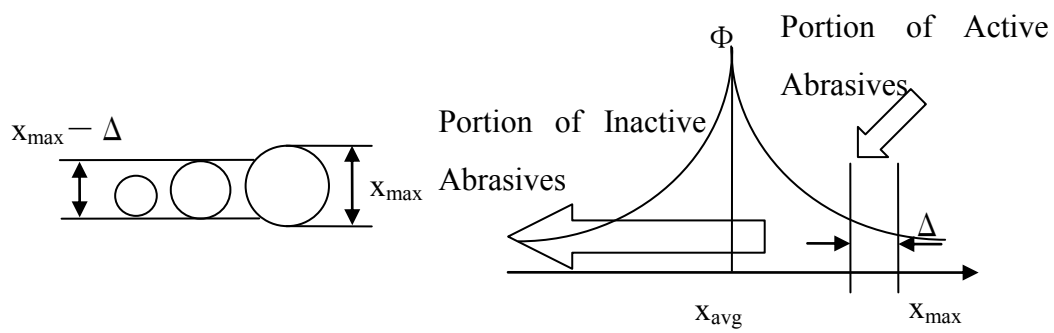


図 2.7 大きな粒子の近傍における Δ と材料除去に寄与する可能性のある砥粒との間の関係を示した図

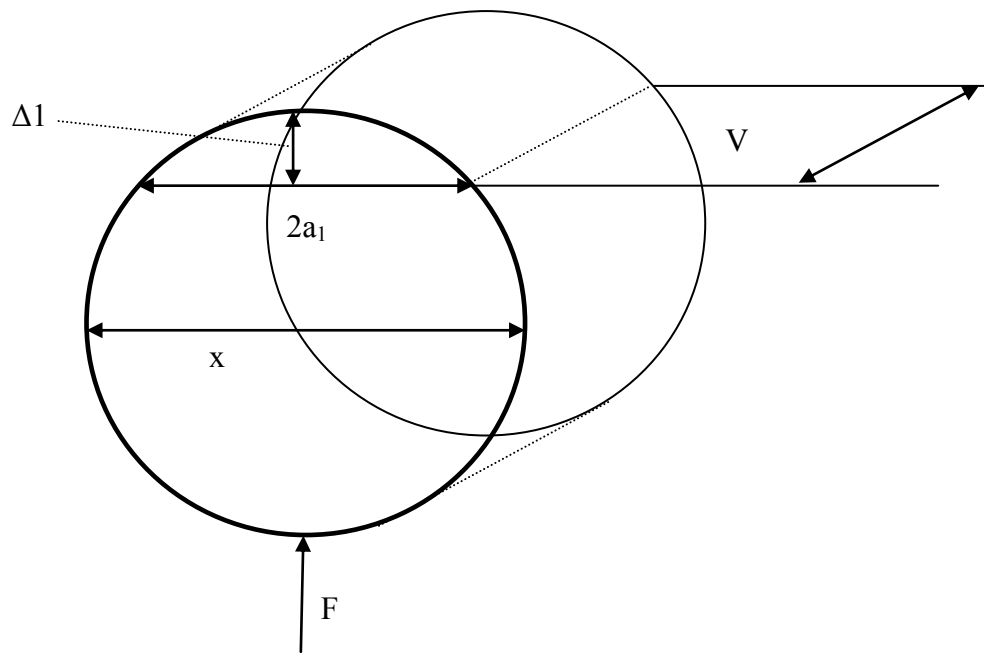


図 2.8 単一粒子の材料除去モデル

よって $\overline{Vol}_{removed}$ は上記の関係式から求めることが出来る．

$$\overline{Vol}_{removed} = \Delta_1 a_1 V = \frac{2\sqrt{2}F}{\pi x_{avg-a} H_w} \sqrt{F / \pi H_w} V = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{x_{avg-a}^2 E_p}{(b_1 H_w)^{3/2}} \sqrt{P_0} V \quad (4)$$

式(1), (2), (4)より MRR_{mass} は

$$MRR_{mass} = C_1 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(3-C_2 P_0^{1/3})} \exp(-t^2 / 2) dt\right) \sqrt{P_0} V \quad (5)$$

となる．ここで MRR_{mass} :材料除去量, t :時間, P_0 :研磨圧力, V : ウェハの相対速度である． C_1 を以下に示す．

$$C_1 = \rho_w k^2 A_0 \frac{2\sqrt{2} d_s \rho_s m_{s-a} D_{SUM} a l}{\rho_a \pi x_{avg}} \frac{E_p}{(b_1 H_w)^{3/2}} \quad (6)$$

ここで ρ_w : ウェハ密度, x_{avg} : 研磨粒子の平均的な直径, ρ_a : 研磨粒子の密度, d_s : スラリーの希釈割合, ρ_s : 希釈前のスラリーの密度, m_{s-a} : 希釈前のスラリーの濃度, a : パッドの細かい穴一つの面積, l : パッドの細かい穴一つの深さ, E_p : パッドのヤング率, b_l : 粗さ係数, H_w : ウェハの硬度, A_0 : 研磨粒子の接触面積, $k: x_{avg-a} = k \cdot x_{avg}$ を満たす係数 (x_{avg-a} は実際に接触している平均的な研磨粒子の直径), D_{SUM} : 単位面積あたりのパッド凸部の頂点の密度である．次に C_2 を以下に示す．

$$C_2 = \frac{0.25 \times \left(\frac{4}{3}\right)^{2/3} (x_{avg} + 3\sigma) \left(\frac{1}{H_p} + \frac{2}{H_w}\right) E_p^{2/3}}{\sigma b_1} \quad (7)$$

ここで σ : 研磨粒子径の粒度分布の標準偏差, H_p : パッド硬度である．

このモデルは式(1)をベースとしてそれぞれの値を考えている．また，ウェハの相対速度と圧力の関係だけでなく，CMP のシミュレーションにとって重要なパラメータであるウェハの硬さ，パッドの硬さ，パッドの粗さや，研磨粒子の大きさ，研磨粒子の形状を考慮して式をまとめている．またウェハの硬度の値は化学溶液と研磨粒子を含むスラリーと研磨粒子のみのスラリーを用いた二つの実験結果を参考に反応生成物の硬さを算出しており，機械的作用と化学的作用を組み合わせたモデルとなっている．

2.3.5 藤田らが考える材料除去メカニズム

藤田ら^{2.12)2.13)}は、CMP 技術で重要な要素とされているポリシングパッドに着目しパッド表面のポア密度や微小粗さ(アスペリティ)などのパッド表面の幾何学的形状に着目するのではなく、パッド表面の化学的構造の変化に着目して評価を行っている。ドレッシングをしない状態でシリコン酸化膜を研磨し続けた場合、研磨レートの急激な低下が見られ、シリコン酸化膜研磨時に生じるシラノール基の増大がその原因であると述べている。また、ドレッシングを行わずにシリコン酸化膜を研磨し続けた場合、図 2.9 のようなパッド表面へのスラリー中の粒子の吸着現象が発生すると述べている。シリコン酸化膜の研磨には高分子材料であるポリウレタン製のパッドが広く用いられている。スラリー中の SiO_2 粒子表面のシラノールがパッドの極性分子と結びつき、ウェハへ作用するシラノール基が減少し化学反応を妨げるため、研磨レートが減少してしまうことを示した。さらにシラノール基の含有量が異なるスラリーを作成し、研磨実験を行ったところ、シラノール基を多く含むスラリーは研磨レートが大幅に低下し、シラノール基がシリコン酸化膜の研磨に大きな影響があることを示した。

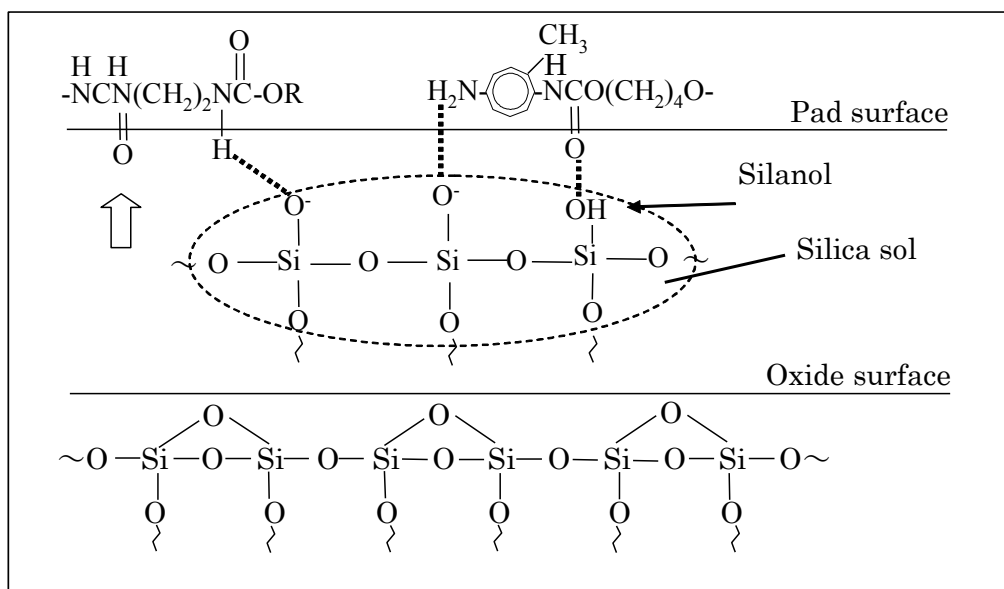


図 2.9 酸化膜研磨時のパッドの表面状態模式図

2.3.6 本間らのモデル

本間ら^{2.14)2.15)2.16)}は CMP 中の摩擦特性に着目し、力学的メカニズムを解析することで材料除去メカニズムを説明した。まず、Preston^{2.6)}の式を引用し、CMP における研磨速度はウェハとパッドとの間で消費されるエネルギーに比例するはずであると予測を立て、Preston の式を見直している。その式を(1)に示す。

$$RR=h \cdot n \cdot p \cdot v+c \quad (1)$$

h は新たに定義した研磨効率という比例係数である。 n は動摩擦係数、 c はスラリーの化学反応性などを考慮した一般化のための項であり p は圧力、 v は相対速度をあらわす。式(2)に Preston の式を示す。

$$RR=k \cdot p \cdot v+c \quad (2)$$

式(1)と式(2)は $k=h \cdot n$ と考えると両者は一致する。このような数式の仮定を立て比例定数である研磨効率 h と動摩擦係数 n を研磨中の摩擦力測定実験から導き、研磨速度と摩擦力との関係を考察した。最終的に

$$RR=h(T, v) \cdot n(T, v) \cdot p \cdot v+c \quad (3)$$

式(3)に表わす関係式を導き、研磨効率 h と動摩擦係数 n は温度と相対速度に依存して変化することを示した。

また CeO_2 粒子を用いた pH 値の低いスラリーによるシリコン酸化膜の研磨では図 2.10 のような現象が発生することを示した。正電荷に帯電したセリアが負に帯電している SiO_2 層へと接触した際に、電荷の移動が発生し、セリアは三価のセリウムへと変化する。その際、凝着が発生する。そして溶液中の正電荷を三価のセリウムが受け取る際に、セリアへと変換し SiO_2 層表面から離れる。その際、ウェハ表面の物質が除去されるというメカニズムである。

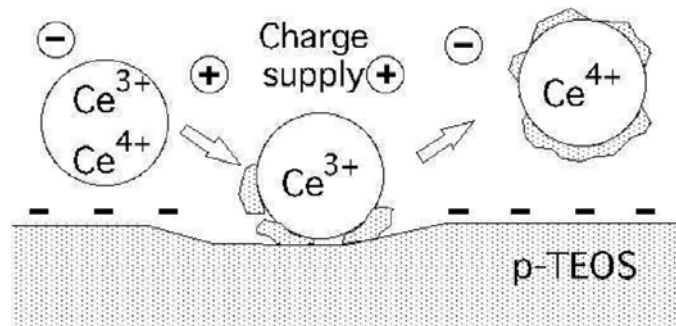


図 2.10 CeO_2 粒子を含むスラリーによる研磨メカニズム

2.3.7 Runnels のモデル

Runnels^{2,17)}はスラリー流体のせん断応力に基づいたウェハ表面の材料除去モデルを示している。スラリーを粘度一定のニュートン流体と仮定すると、研磨パッドとウェハ間の流体の流れは3次元 Navie-Stocks の方程式(1)(2)で記述できる。

$$\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ρ は流体の密度、 μ は動的粘性、 p は圧力、 \mathbf{u} は流体中の任意の位置での速度ベクトルである。図2.11のような凸状の2次元パターン形状と境界条件を考える。表面応力 σ は次式で流れ場と関係付けられる。

$$\sigma_{ij} = -p \cdot \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

δ_{ij} は Kronecker のデルタ、 σ_{11} , σ_{22} は x_1 , x_2 方向の垂直応力であり、 $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ は x_1 , x_2 方向のせん断応力を表す。ウェハ表面からは無限小の単位で連続的に除去が行われるとすると、表面に垂直方向の除去速度 R_n はウェハにかかる垂直応力 σ とせん断応力 τ の関数として表される。

$$R_n = f[\tau(t), \sigma(t)] \quad (4)$$

この式(4)の Tayler 級数展開式である式(5)を Runnnels はモデル式と考えている。

$$R_n = k\sigma(\tau + d\tau^2) \quad (5)$$

k と d は材料の特性と化学的作用を表わす定数である。このような流体の作用による材料除去モデルを提案している。

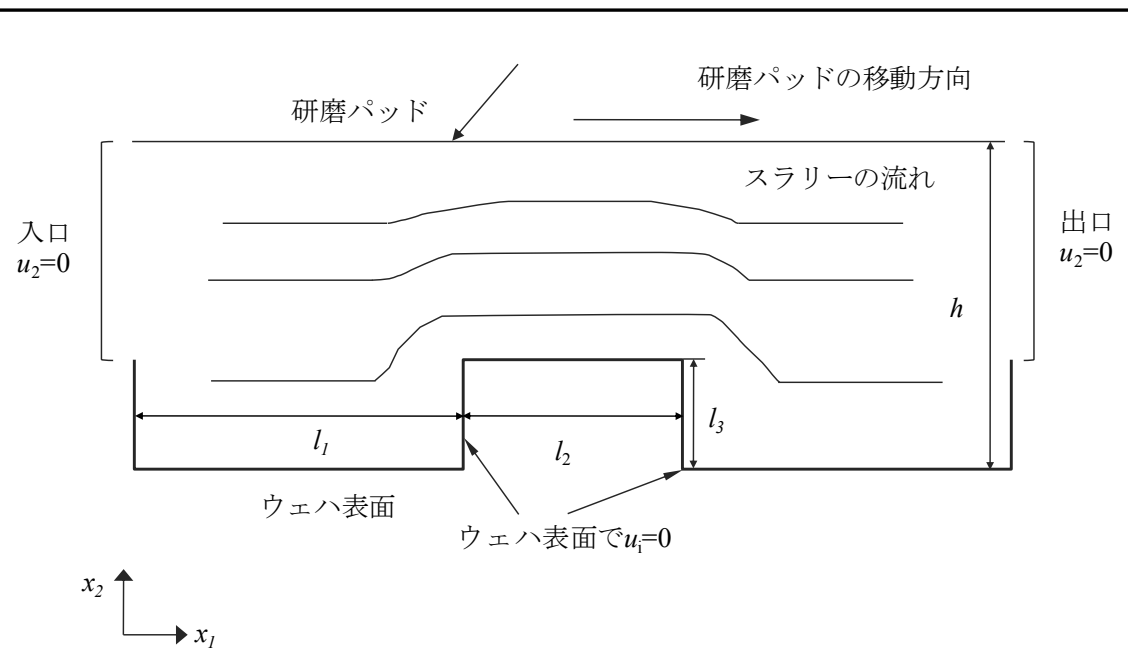


図 2.11 流体力学解析における 2 次元パターン形状と境界条件

2.3.8 三好らのモデル

三好ら^{2,18)}は単位研磨粒子による研磨作用に着目しモデル化を行っている．CMPにおける研磨作用は単位研磨粒子によるアブレイブ摩耗の総和であると仮定している．ウェハと単位研磨粒子間に作用する接触荷重と，ウェハの研磨に寄与する研磨粒子数は Greenwood-Williamson の粗面-平滑面間の接触理論(GM モデル)を用いて説明している．まずスラリー中の研磨粒子の状態について

①研磨粒子はスラリー中に均一に分散している．

②すべての研磨粒子は平均径 d_p の球形である．

③すべての荷重は，スラリー中の研磨粒子によってウェハに伝達される．

という三つの仮定を立てて単位研磨粒子がウェハに及ぼす力の関係式(1)，(2)を算出している．

$$A_r = \pi N \beta \int_d^{\infty} (z - d) \varphi(z) dz \quad (1)$$

$$P = \frac{4}{3} \pi N E \beta^{1/2} \int_d^{\infty} (z - d)^{3/2} \varphi(z) dz \quad (2)$$

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s} e^{-\frac{z^2}{s^2}} \quad (3)$$

π ：円周率， N ：パッド上の突起数密度， β ：突起先端の平均曲率半径， z ：各突起と突起の平均高さまでの距離， d ：突起の平均高さとのウェハ表面との距離， E ：パッドのヤング率， $\varphi(z)$ ：パッド上突起高さの確率分布， s ：パッド表面の算術平均粗さ．

A_r はパッドーウェハ間の真実接触面積で P はパッドーウェハ間に作用する研磨圧力である． A_r ， P を求め，式(4)に値を代入することで研磨粒子1個に作用する接触荷重 F_p を求めている．

$$F_p = \frac{P}{A_r} \cdot \frac{\pi d_p^2 \rho_p}{6n\rho_s} \quad (4)$$

d_p ：単位面積でのスラリー液膜の厚さ， ρ_p ：研磨粒子の密度， n ：スラリー中の研磨粒子の重量密度， ρ_s ：スラリーの密度，

これらの式の妥当性を検証する為に単位研磨粒子による研磨作用を評価する

ための試験ツールとして原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope: AFM）を利用し，図 2.12 のような微小摩耗評価試験によって，単位研磨粒子による研磨作用を評価した．

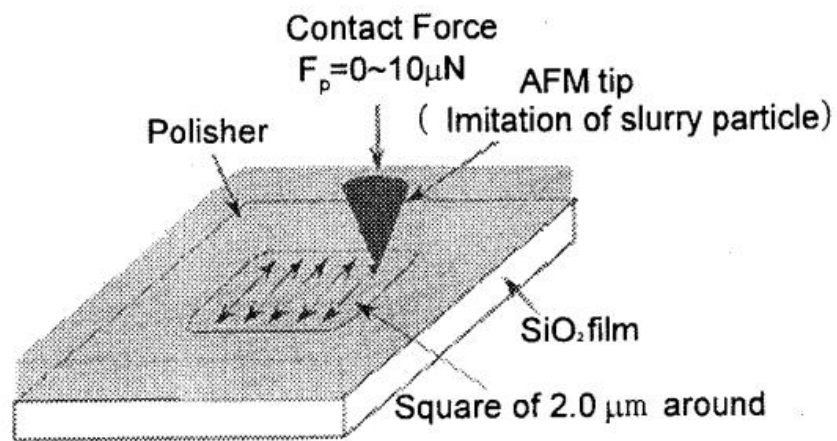


図 2.12 AFM 微小摩耗試験の概略図

結論としてAFMを利用した微小摩耗試験と研磨メカニズムモデルを組み合わせたシミュレーション実験が CMP 実機における研磨レートの結果と比較して 22%程度の誤差で予測できることを示した．

2.4 研究の必要性と目的

CMP はシリコン酸化膜や層間絶縁膜を対象にした SiO_2 -CMP、垂直プラグの材料として使用される W や配線金属として使用される Cu 等の金属を対象とした Metal-CMP に分けられる。本研究では多層配線構造の下層で実施され、高い平坦化性能が求められる STI-CMP の対象物質である SiO_2 -CMP に着目し研究を行った。2.3 に現在までに考えられている材料除去モデルを示した。Preston のモデルはマクロな視点で研磨の材料除去をモデル化した式であり、CMP の材料除去現象の詳細にまでは触れていない。藤田らの材料除去メカニズムは研磨レートの低下の原因がシラノール基にあることを述べた考え方であり、ウェハ表面の材料除去メカニズムについては触れていない。本間らのモデルは研磨レートと動摩擦力についての関係をモデル化したものであり、これも材料除去現象の細部まで考察しているとは言えない。CeO₂ 粒子によるモデルも提案しているが、 SiO_2 -CMP で広く用いられるシリカ粒子が含まれるスラリーについては考慮していない。Runnels のモデルは流体がウェハ表面を極微量削っていくというモデルであり、スラリー中の粒子についてはまったく考えておらず、不十分であると言える。泉谷、Oliver、Shi、Luo、三好らのモデルは粒子がパッドによってウェハに押し付けられ、粒子がウェハ表面を削り取ることで材料除去が発生する現象をモデル化したものである。しかしながら、削り取る過程で生じると考えられるナノメートルオーダの加工痕が見られない、ポリシングパッド表面に粒子が弱く結合した状態で、ウェハ表面へと強く食い込むとは考えにくい等、このモデルには問題点がある。さらに CMP 中で使用される粒子は現在では粒子全体の表面積を増大させ研磨レートを向上させるためにナノメートルオーダの粒子が用いられているが、ナノメートルオーダの粒子はそれまでのマイクロメートルオーダの粒子と比べて反応性が高く、電気的・機械的特性が異なると言われている^{2,19)}。研磨粒子によるアブレイブな作用によって材料除去が進行するという考え方は性質の異なるナノメートルオーダの粒子を使用する CMP の研磨にそのまま適用できるとは言えない。つまり、 SiO_2 -CMP でその純度の高さから最も用いられるシリカ粒子を含んだスラリーによる材料除去メカニズムの理解とモデルは不十分であると言える。

本研究ではシリカを含んだスラリーを使用する SiO_2 -CMP における材料除去現象の未解明な点を調査し、研磨メカニズムを考えモデル化する。特に CMP の材料除去で最も重要な要素であるスラリーに着目し、実験を行うことで現象モデルの構築を目的としている。

参考文献

- 2.1) 土肥俊郎 編：詳説半導体 CMP 技術，工業調査会 (2001).
- 2.2) 辻村学 著：図解 半導体ウェットプロセス最前線，工業調査会 (2007).
- 2.3) 精密工学会「プラナリゼーション CMP とその応用技術専門委員会」 編：
CMP 技術大系，グローバルネット株式会社 (2006) pp.502-509.
- 2.4) 宮地計二，清家善之，土肥俊郎：高圧マイクロジェットを用いた CMP パッドコンディショニング技術，埼玉大学地域共同研究センター紀要，vol. 7 (2006)，pp.14-19.
- 2.5) 精密工学会 プラナリゼーション CMP とその応用技術専門委員会 編：
半導体 CMP 用語事典，オーム社 (2008).
- 2.6) F. W. Preston : The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines,
J. Soc. Glass Technol., 11 (1927), pp.214-256.
- 2.7) T. Izumitani, S. Adachi : Polishing Mechanism of Fused Silica Glass, Science of Polishing: Topical Meeting, Monterey CA(1984) TuB-A1-1.
- 2.8) Michael R. Oliver, Robert E. Schmidt and Maria Robinson : CMP pad surface roughness and CMP removal rate, Electrochemical Society Proceedings, Volume 2000-26, pp.77-83.
- 2.9) 土肥俊郎：CMP とその加工メカニズム，トライボロジスト，45，10 (2000)，pp.713-720.
- 2.10) F.G.Shi, B.Zhao : Modeling of Chemical-mechanical polishing with soft pads, Appl. Phys. A, vol. 67, pp.249-252, 1998.
- 2.11) J.Luo, D.A.Dornfeld : “Material Removal Mechanism in Chemical Mechanical Polishing: Theory and Modeling, ” IEEE TRANSACTIONS ON SEMICONDUCTOR MANUFACTURING, VOL.14 NO.2 pp.112-133 MAY 2001.
- 2.12) 藤田隆：パッド表面分析による研磨メカニズムの研究(第1報)-FT-IR およびラマン散乱分光分析による立ち上げパッド表面状態の解析-，精密工学会誌，73，9 (2007)，pp.1014.
- 2.13) 藤田隆，石倉美奈子，河井奈緒子，森岡善隆：パッド表面分析による研

-
- 磨メカニズムの研究(第 2 報)-ドレッシング無しの研磨過程におけるパッド表面状態の解析-, 精密工学会誌, 74, 8 (2008), pp.815.
- 2.14) 本間善夫: CMP メカニズムと摩擦特性, トライボロジスト, 第 51 号, 第 7 号 (2006), pp.512-517.
- 2.15) Yoshio Homma: Dynamical Mechanism of Chemical Mechanical Polishing Analyzed to Correct Preston's Empirical Model, J. Electrochem. Soc., 153 (2006), pp.G587-G590.
- 2.16) Yoshio Homma, Tsuyoshi Masuda, Jayakrishnan Nair, James Shen: Mechano-Electrical Polishing Mechanism of SiO₂ by Cerium Oxide Slurry, International Conference on Planarization/CMP Technology, Fukuoka, Japan, (November 19-21, 2009) pp.35-39
- 2.17) Scott R. Runnels: Feature-Scale Fluid-Based Erosion Modeling for Chemical-Mechanical Polishing, J. Electrochem. Soc., Vol.141, no.7, (July 1994), pp.1900-1904.
- 2.18) 三好淳之, 松川公映, 松尾洋, 酒井忠之, 野末勝: 原子間力顕微鏡による CMP のシミュレーション, 日本機械学会論文集(C 編), 71 巻, 701 号 (2005-1), pp.280-285.
- 2.19) 小泉光恵, 目義雄, 中條澄, 新原皓一 編: ナノマテリアルの技術, シーエムシー出版 (2001).

第3章 スラリー流れの可視化による材料 除去メカニズムの考察

3.1 緒言

CMP 中のスラリーの流れを可視化し観察することで、流れの定性的な評価が可能である^{3.1)}。スラリーの流れは作用粒子数と呼ばれるスラリー中の粒子がウェハに作用する数と深く関係している。スラリーの流量が増大すると絶対的な作用粒子数が増加し材料除去量も大きくなると考えられるが、そのスラリー流量と研磨量との関係は未だ未解明な点が多く、その関係について検討の余地がある。本章では、角型石英ガラスのポリシング時のスラリー流れの可視化実験を行い、ポリシングへの影響評価を試みる。CMP を行う際にはスラリー流動の安定化と研磨レートを向上させるために一般的に格子状の溝を作ることがある。そこで、ポリシングパッド表面に溝を形成したポリシングパッドを用意し溝がないパッドとのスラリーの流れの変化の評価を行う。さらに可視化実験で使用したポリシングパッドを使用して、研磨量とスラリー流れの関係について検討する。

3.2 スラリーの可視化

3.2.1 可視化法

本実験では□140mm の石英ガラスを研磨する際のポリシングパッドー石英ガラス間に流入するスラリーを観察するため蛍光剤を用いて可視化実験を行った。使用した蛍光剤は紫外線の照射により発光するものであり、純水に溶解し、スラリーの代替流体として用いた。

ポリシングパッドー石英ガラス間に超純水を滴下しポリシングをおこない、その後、蛍光剤を滴下することでポリシングパッドー石英ガラス間に蛍光剤を流入させ、そこに紫外線を照射して蛍光剤自身を発光させ可視化を行う。蛍光剤をスラリーの代替流体として用いることでポリシングパッドー石英ガラス間の蛍光剤が流入した部分だけが発光しスラリー流れを確認することができる。

通常はウェハキャリアを用いて被ポリシング材料を保持し、ウェハ上方からポリシングパッドに押し付け、ウェハキャリア、ポリシングパッドに回転を与え研磨を行う。しかし、石英ガラスを用いて可視化を行う際に石英ガラスを上から押さえつけて回転を与えることはポリシングパッドーウェハ間のスラリー流れ可視化の妨げになる。そこでローラキャリアを製作し石英ガラス上面を開放し、上方からのビデオカメラによる観察を容易にした。石英ガラスは、ポリシングパッドの回転による従動、もしくはモータからのベルトによる強制回転により回転させた。詳細は 3.2.2 実験装置に示す。

図 3.1 にスラリー流れ可視化方法の概要図を示す。被ポリシング材料である石英ガラスは、50mm 厚の円盤の片面に□140mm の角型形状凸面を形成し、その凸面を角型材料と考えて蛍光剤観察を行なった。初期状態としてポリシングパッド上を超純水で満たし、超純水の滴下を中止すると同時に蛍光剤を滴下し始め、さらに紫外線を照射することによって蛍光剤を発光させ、スラリー流れの可視化を行い、その様子をビデオカメラで撮影した。

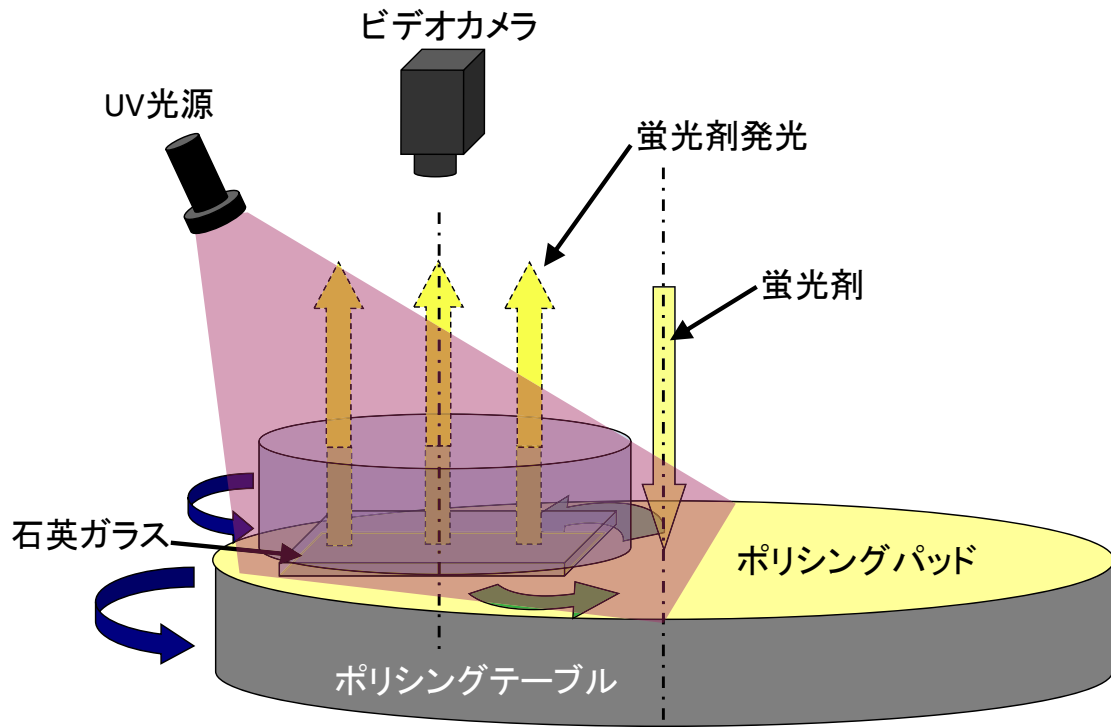


図 3.1 スラリー流れ可視化方法

3.2.2 スラリー流れ可視化装置

実験では、 $\phi 200\text{mm}$ ウェハ研磨用のポリシング装置(ナノテックマシーンズ社製 NANOTECH-450-FODCAb)を用いて、 $\square 140\text{mm}$ の石英ガラスに対するスラリー流れの可視化実験を行った。実験装置の外観写真を図 3.2 に示す。

通常、研磨を行う際、石英ガラスをキャリアで保持し、キャリアに回転を与え垂直な荷重を作用させ研磨を行う。本実験では、石英ガラス下面での蛍光剤の流れ観察を容易にするため、図 3.3、図 3.4 に示すようにキャリアの代わりとして、 $\phi 200\text{mm}$ の合成石英ガラスに $\square 140\text{mm}$ の凸部を形成し、その石英ガラスを用いた。石英ガラスは、図 3.5 に示すようなローラキャリアを製作し、ポリシングパッドの回転による従動回転により回転させた。条件により、従動回転しない場合はモータによって強制回転を与えた。スラリーの代替流体として超純水を用い、ポリシング開始時は石英ガラス周辺を純水で満たした。蛍光剤は CMP で使用するスラリーとほぼ同じ粘性にするため純水を用いて 100 倍に希釈して使用し、観察開始時に蛍光剤を滴下し、超高圧水銀灯(MEJIRO PRECISION 社製 SHG-200)から紫外光を照射して蛍光剤を発光させ、ビデオカメラによりその様子を撮影した。

初期状態としてポリシングテーブルに貼り付けられたポリシングパッド上を超純水で満たし、ポリシングテーブル中央に超純水の滴下を行い、ポリシングテーブルを回転させる。ある一定時間が経過した後に超純水の滴下を中止すると同時に蛍光剤を滴下し始め、その際に紫外光を照射することによって蛍光剤を発光させ、流れの可視化を行い、その様子を上方からビデオカメラを用いて撮影を行った。流れの評価を容易にするため撮影した動画を静止画に変換し、画像処理プログラムにより蛍光剤の色成分抽出処理を行い、判別を容易にした。



図 3.2 スラリー流れ可視化装置外観写真

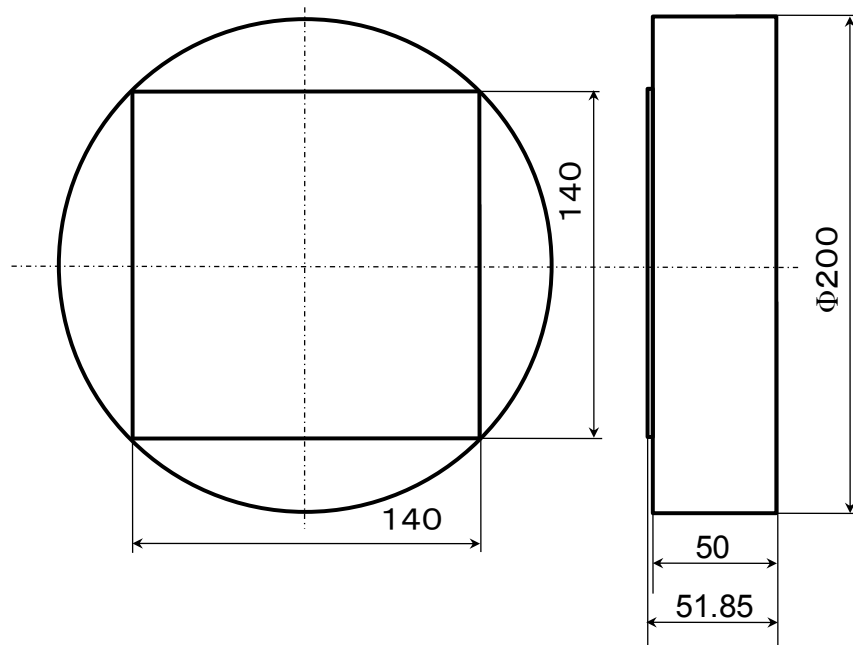


図 3.3 □140mm 付き石英ガラス

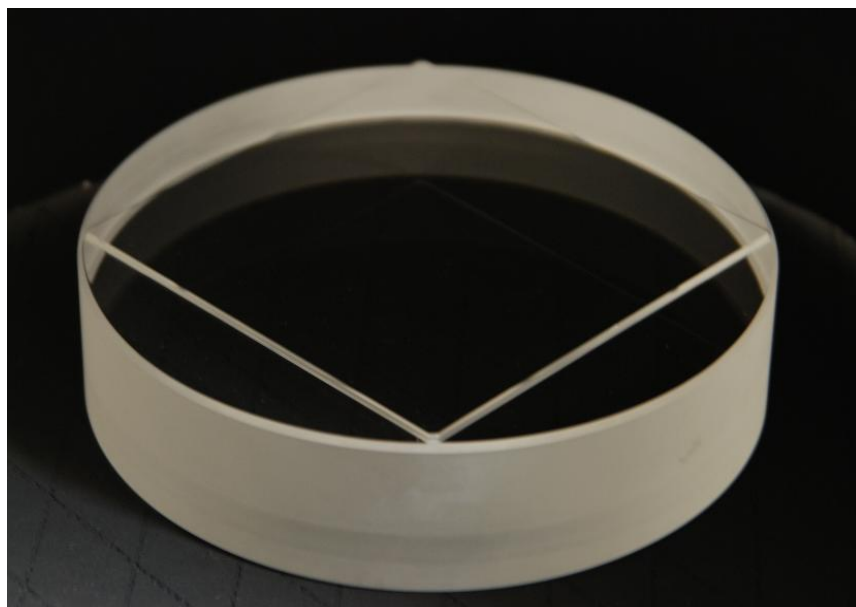


図 3.4 石英ガラスの外観写真

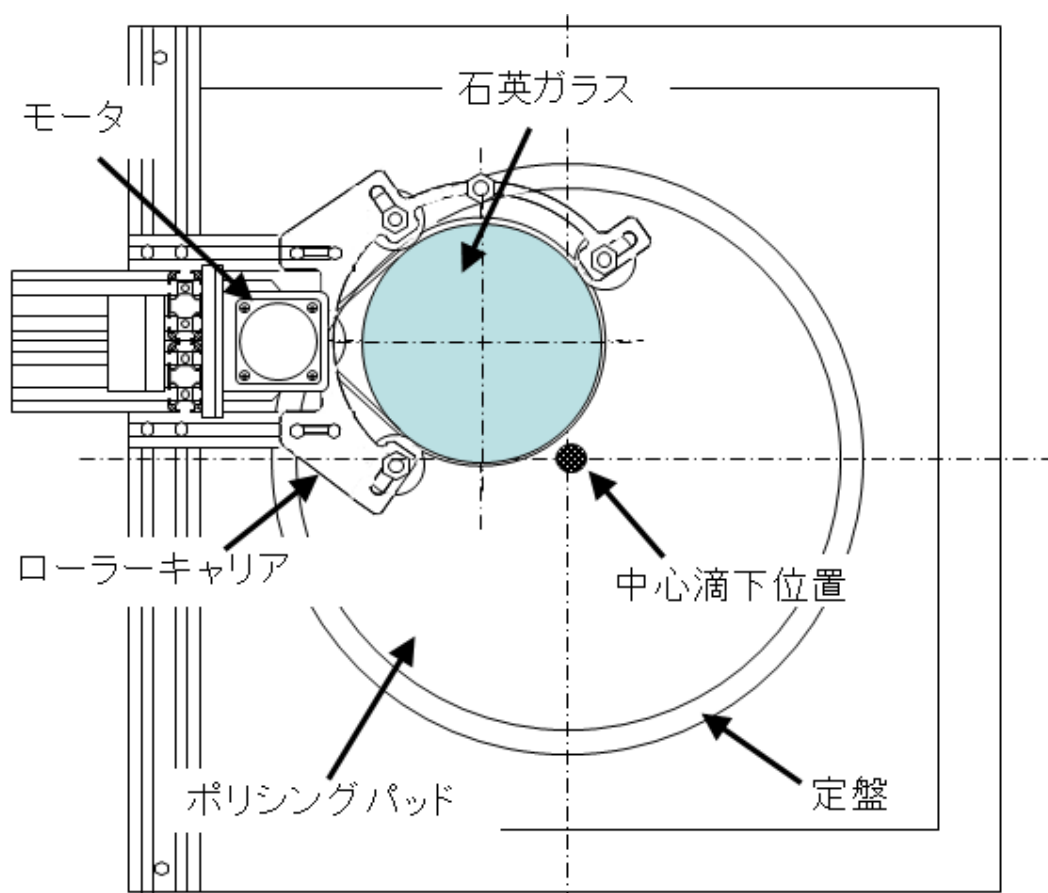


図 3.5 装置レイアウト図

3.2.3 実験条件

ポリシングテーブル回転数を 30rpm, 角形石英ガラス回転数を 60rpm, 蛍光剤流量を 100ml/min に設定し蛍光剤流れ可視化実験を行った. 図 3.6 に構成図を示す. ポリシングパッドには発泡ポリウレタン製のものを用い, 溝が形成されていないポリシングパッド (以下, フラットパッド) とピッチ 15mm で格子状の溝パターンを持つポリシングパッド (以下, P15 格子溝パッド) の2種類のポリシングパッドを用いて実験を行った. なお, 溝を持つパッドの溝幅は 1mm, 溝深さは 1mm である. 図 3.7 にその溝パターン形状を示す.

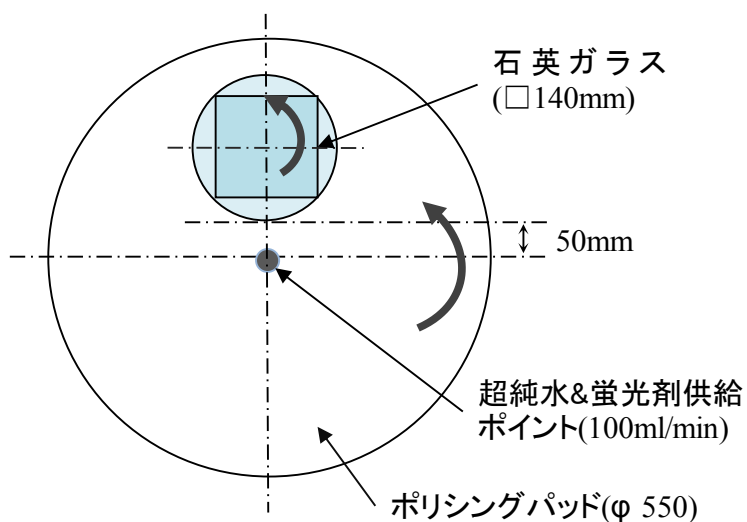


図 3.6 石英ガラスとポリシングパッドの構成位置

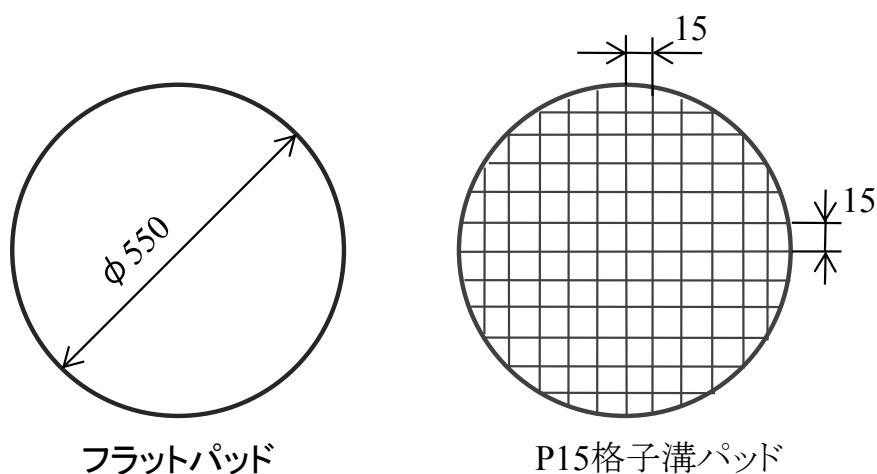


図 3.7 ポリシングパッド溝パターン形状

3.2.4 フラットパッドにおける蛍光剤の流れ

まず、フラットパッドを用いた場合の蛍光剤の流れについて観察した。図 3.8 に蛍光剤の流れを撮影した動画を静止画像に変換した画像を示す。画像の下に数字は 0 秒の画像からの経過時間を表しており、このとき 0 秒は蛍光剤が角形石英ガラスに到達した時の画像としている。灰色の部分が蛍光剤を表し、画像には角形石英ガラスの位置を把握するために十字状の目印を付けている。

ポリシングパッドに滴下された蛍光剤の大部分は石英ガラス外周を流動し、一部は石英ガラス下面に流入し研磨に寄与する。図 3.8 から大部分の蛍光剤は石英ガラス外周を移動していることが確認できる。そこで、初めに石英ガラス外周の蛍光剤の移動について考察を行った。図 3.8 から得られた画像をもとに、ある一定量の蛍光剤の流れを図 3.9 に模式的に示す。図 3.9(a)のようにパッド中心に滴下された蛍光剤はポリシングパッドの回転が生み出す遠心力によって石英ガラスへと到達する。角形石英ガラスのコーナ部がポリシングパッド中心に最接近する A 点に達するとき□形状部の下に直接蛍光剤は流れ込まず、その大部分はコーナ部から□形状部の辺を沿って図 3.9(b)のように流れる。その後蛍光剤は角形石英ガラスが回転するとともに図 3.9(c), (d), (e)のように辺に沿って流れていく。図 3.9(d), (e)で蛍光剤の一部の流れが角形石英ガラスの回転とは逆方向となるのは、ポリシングパッドの回転方向に対して角形石英ガラスの辺が直交するためである。図 3.9(e), (f)に示すように蛍光剤がポリシングパッド中心から最も遠い石英ガラス周辺部である B 点に達すると石英ガラスの外側へ流れ、排出される。角形石英ガラスの研磨の場合、供給された蛍光剤は即座に□形状部下面へと流入せず周辺を沿うように流れ排出されると考えられる。このように蛍光剤は角形石英ガラスの外周を移動し、大部分が排出される。

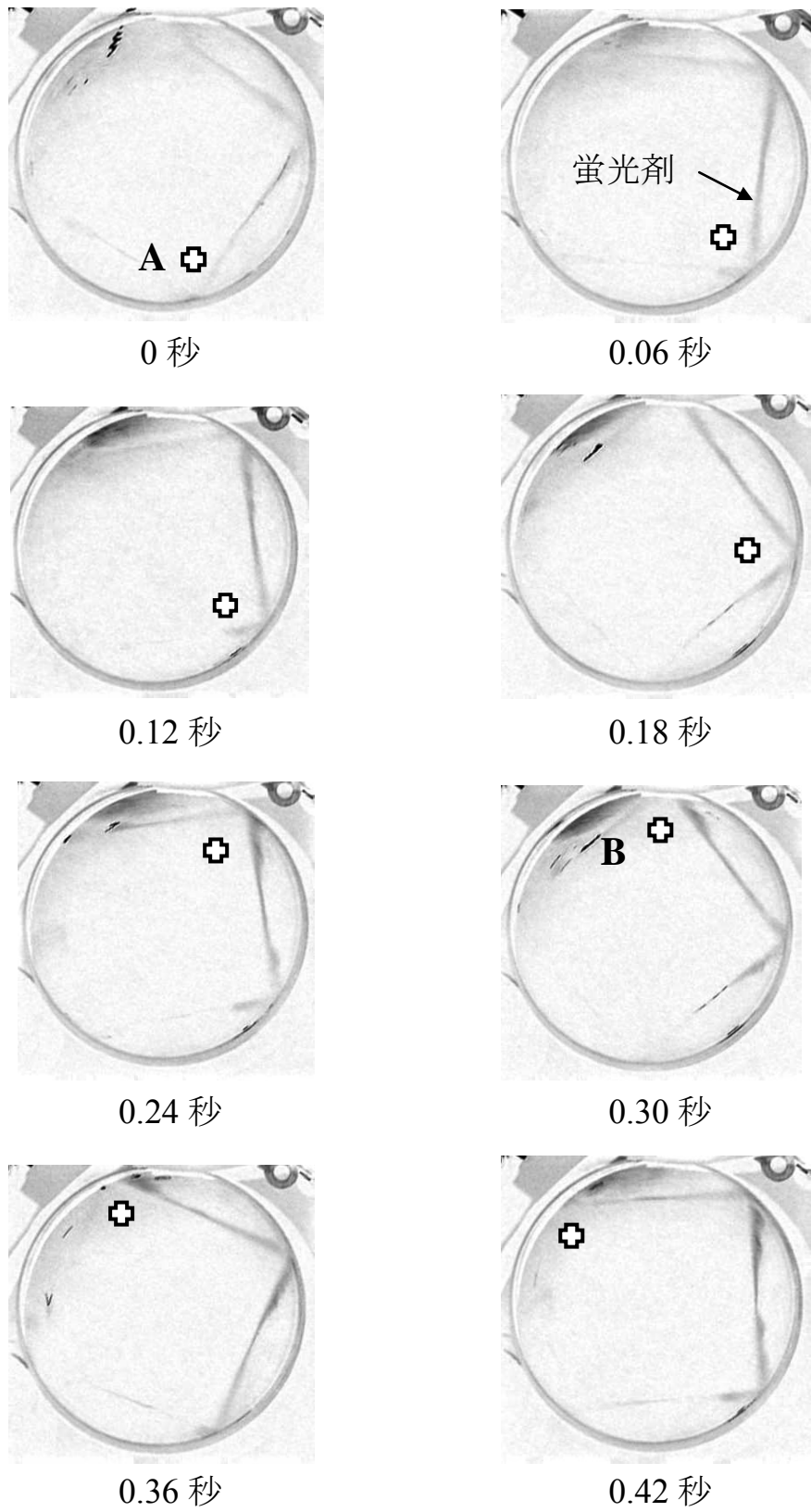
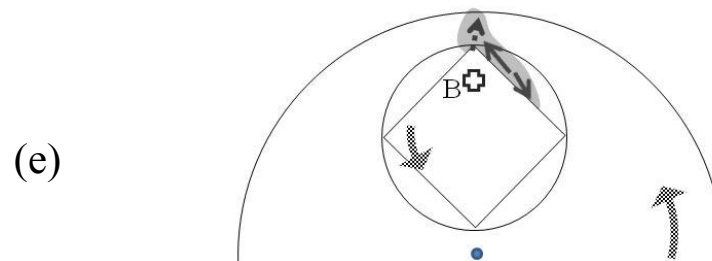
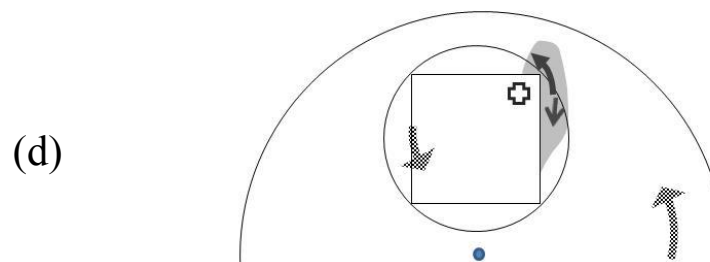
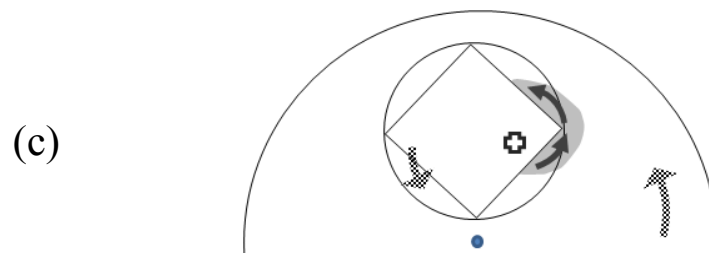
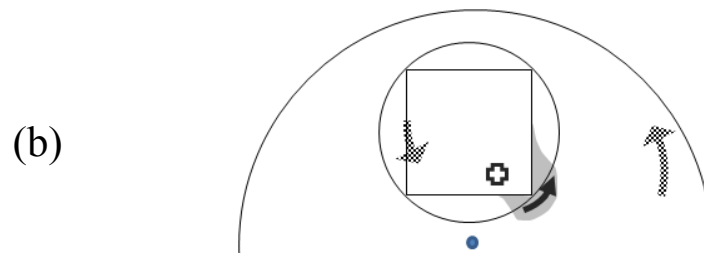
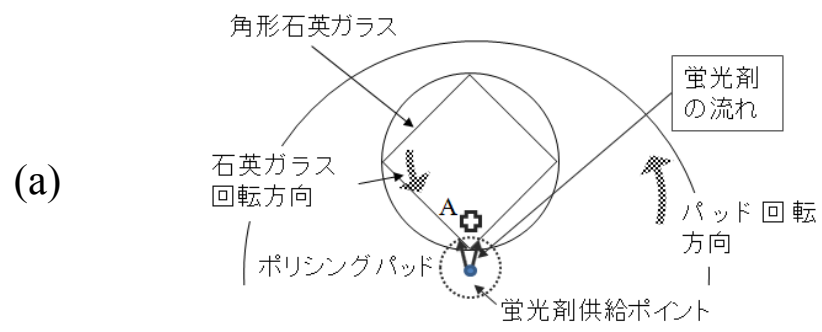


図 3.8 フラットパッドにおける蛍光剤の流れの可視化画像



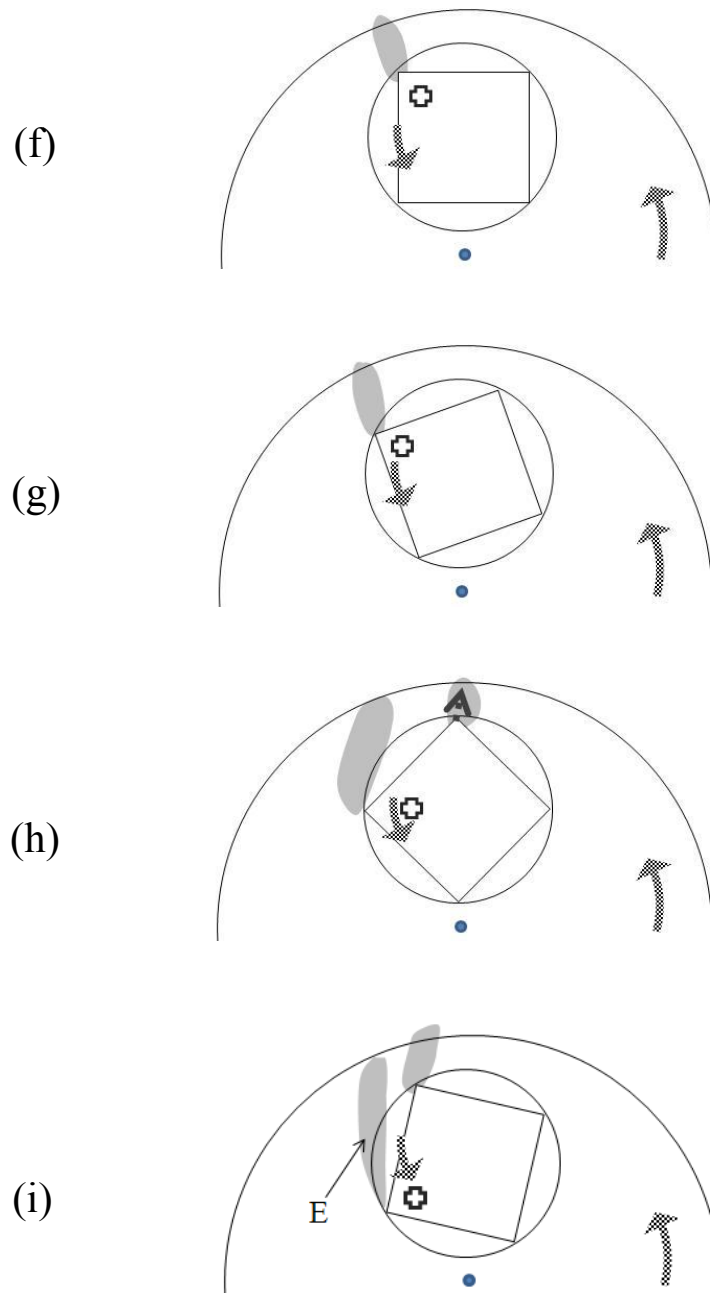


図 3.9 フラットパッドにおける蛍光剤の流れの模式図

次に石英ガラス下面へと流入する蛍光剤について考察していく．図 3.10 にコーナ部からの蛍光剤の流入を観察した画像を示す．図 3.11 に示すようにポリッシングパッド中心近傍では蛍光剤の流入点であるため図 3.11 に示すように蛍光剤溜りが発生する．滴下された蛍光剤の大半は□形状部周辺を移動して排出されるが，中心付近に於いては蛍光剤溜りが発生するためにコーナ部から□形状部下へと少量の蛍光剤が流入すると考えられる．

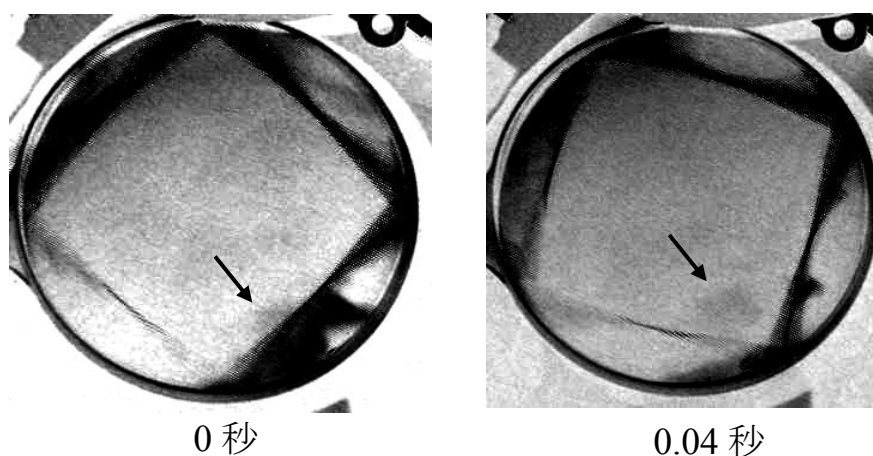


図 3.10 角部からの蛍光剤流入の可視化画像

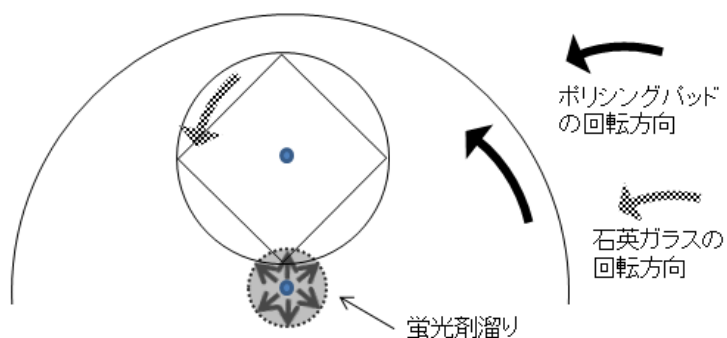


図 3.11 ポリッシングパッド中心近傍の石英ガラスとポリッシングパッドの回転方向

図 3.12 は蛍光剤の供給を始めて 15 秒後の静止画像である．画像下の秒数は 0 秒と示した画像からの経過時間を表している．画像には点線部に示すようにポリッシングパッド中心から放射状にポリッシングパッド上に残留した蛍光剤が確認できる．図 3.12 の画像から，以下のような蛍光剤の流れが生じていると考えられる．図 3.9(e), (h)に示すように□形状部周辺に留まる蛍光剤は角形石英ガラスのコーナ部がポリッシングパッド中心から最も離れたときに排出され始める．石英ガラスが図 3.9(f)～(i)に示すように 120 度回転するまで蛍光剤は徐々に排出される．その後，蛍光剤は図 3.9(i)の E に示すようにポリッシングパッド半径方向に円弧を描きながらポリッシングパッド表面に残留する．放射状に残留した蛍光剤はポリッシングパッドが徐々に回転した後，再び石英ガラスに到達すると図 3.12 に示すような□形状部の下へと流入する現象が生じる．よって，石英ガラス下面への蛍光剤の流入はポリッシングパッド中心近傍の石英ガラスのコーナ部の流入とポリッシングパッド上に放射状に残留した蛍光剤による流入の 2 種の流入が発生していると考えられる．

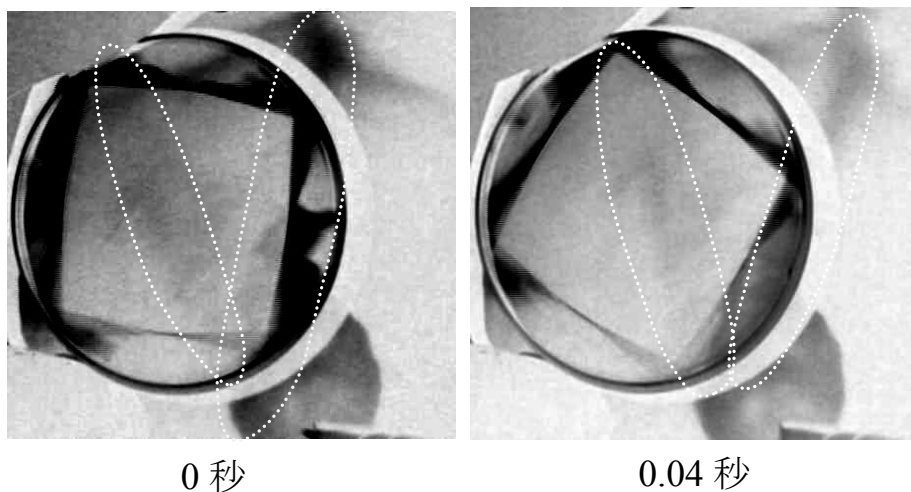


図 3.12 15 秒後の蛍光剤の可視化画像（フラットパッド）

3.2.5 P15 格子溝パッドにおける蛍光剤の流れ

図 3.13 に P15 格子溝パッドを用いた場合の実験結果を示す。ポリシングパッド中心近傍の A 部分でまず蛍光剤が溝に流入するため、フラットパッドと比べ□形状部周辺に沿って流動する蛍光剤は少なく、直接角形石英ガラス下に多くの蛍光剤が流入する。また B 部では□形状部の周辺に沿って流れた少量の蛍光剤が石英ガラス外に排出されることが考えられる。図 3.14 に蛍光剤の供給を始めて 15 秒後の静止画像を示す。フラットパッドの場合と同様に点線部のようなポリシングパッド半径方向に蛍光剤の残留が見られる。蛍光剤はフラットパッドの観察画像と比べると放射状に残留するのではなく X 点、Y 点に示すようなコーナ部を中心に円形状に残留していることがわかる。これはパッド溝間隔が小さいためポリシングパッド中心付近では□形状部へ直接蛍光剤が流入しやすく、周辺部を移動した蛍光剤が排出される図 3.14 の Y 点では石英ガラスより外側へと排出される放射状に残留する蛍光剤が少なく、Y 点で溝部に滞留する蛍光剤が□形状部へと流入するために発生していると考えられる。

図 3.13、図 3.14 の結果を考慮して図 3.15 に蛍光剤の流入を模式的に描いた図を示す。P15 格子溝パッドの流れのメカニズムはフラットパッドの場合と異なり、溝部が多いため蛍光剤はすぐに直接□形状部下へと流入しやすいと考えられる。そのため短時間で石英ガラス下へスラリーが流入しやすくフラットパッドよりも早く均一にスラリーが流入すると考えられる。

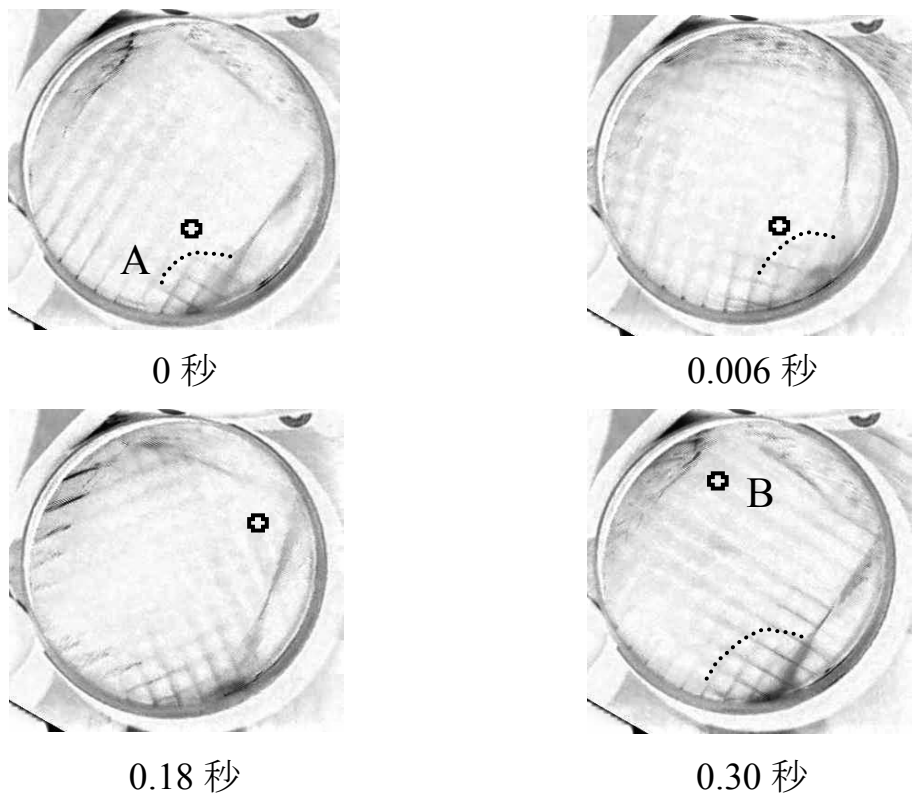


図 3.13 P15 格子溝パッドにおけるスラリー流れの可視化画像

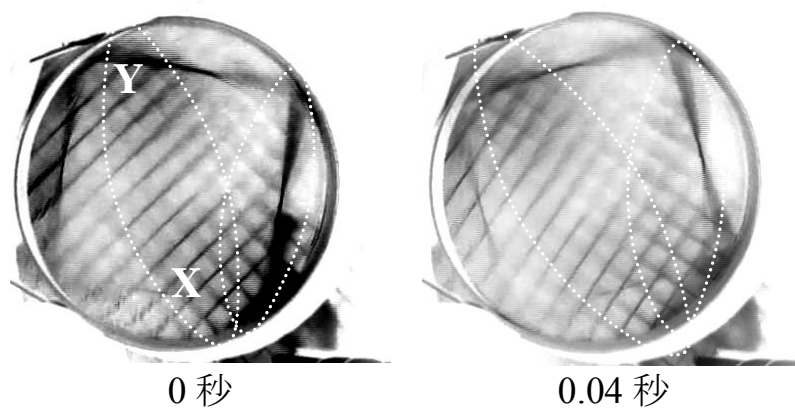


図 3.14 15 秒後のスラリーの可視化画像 (P15 格子溝パッド)

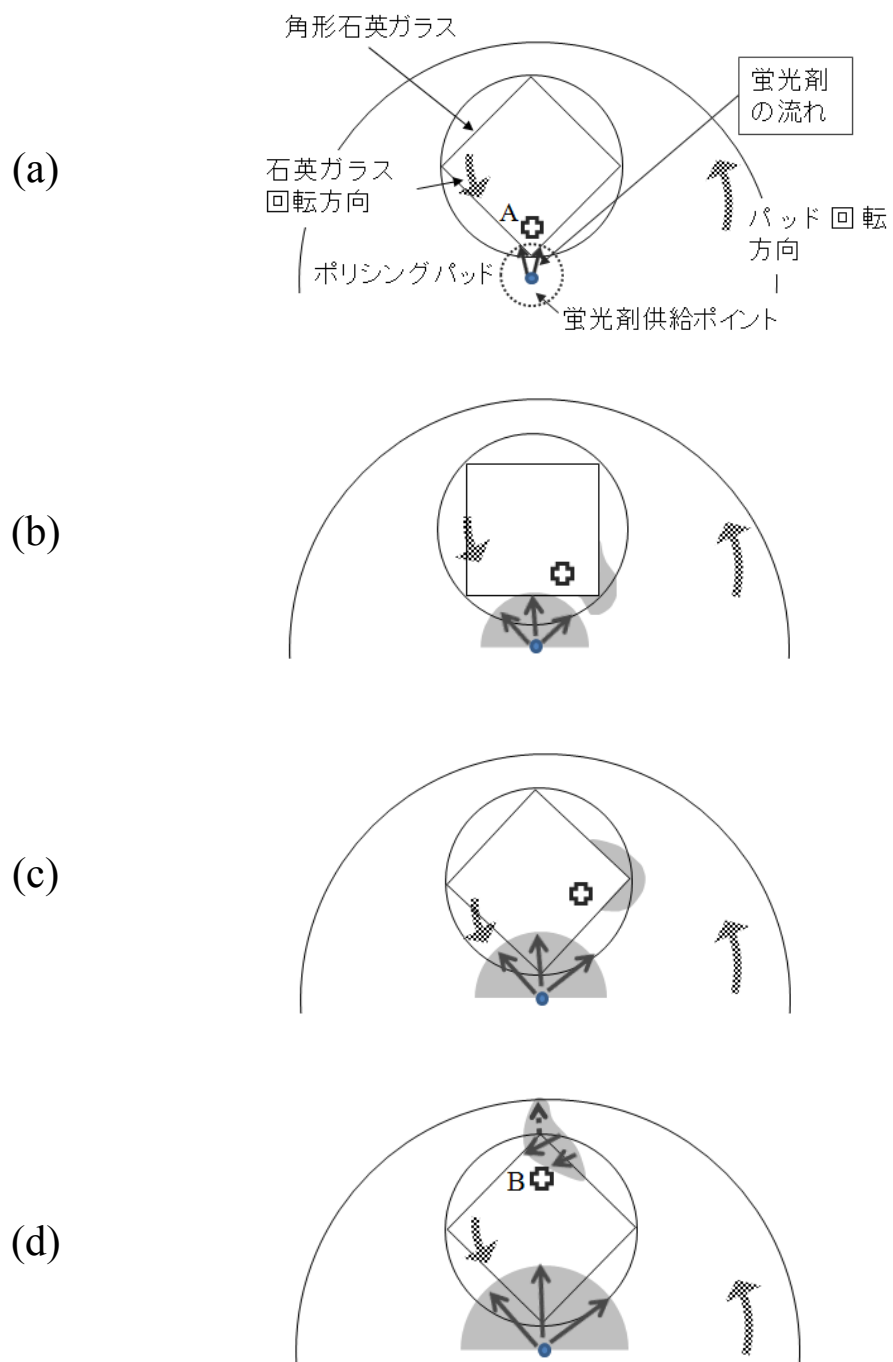


図 3.15 P15 格子溝パッドにおける蛍光剤の流れの模式図

3.3 スラリー流れと研磨量

3.3.1 研磨実験の概要

フラットパッド、P15 格子溝パッドを使用する CMP が研磨に与える影響を調べるため研磨実験を行った。実験装置の外観図を図 3.16 に示す。ポリシングテーブルを回転させることで、ウェハキャリアが摩擦力により従動する構造となっている。実験条件を表 3.1 に示す。スラリー流量は 50ml/min とした。実験前と実験後の試料表面の膜厚をエリプソメータ(Rudolph instruments: Auto EL 4 NIR-3)を使用して測定し、研磨量を評価した。

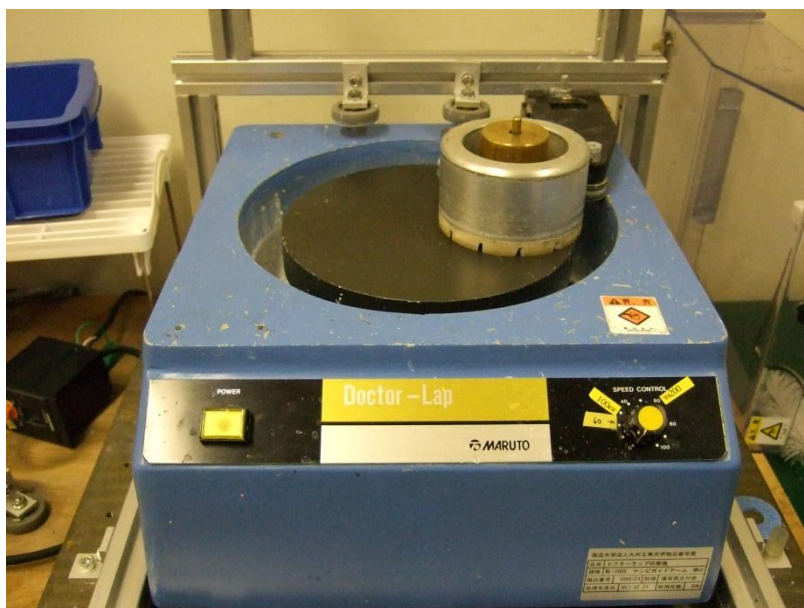


図 3.16 研磨装置

表 3.1 実験条件

Slurry	particle manufacturer	Fumed silica Cabot Microelectronics
	Product name	Semi-Spere 25
Wafer		SiO ₂ wafer
Polishing pad		Polyurethane pad (flat, P15x-y grooved)
Pressure		4 [psi]
Polishing time		5 [min]
Moter rotation rate		60 [rpm]
Temperature		20 [°C]

3.3.2 実験結果と考察

実験結果を図 3.17 に示す。フラットパッドと P15 格子溝パッドを比べると明らかに P15 格子溝パッドを使用した場合の研磨量がフラットパッドの場合と比べて高かった。この結果から、スラリーのウェハ面下への導入量が多い P15 格子溝パッドの場合、作用粒子数が多いため研磨量が増加していると考えられる。

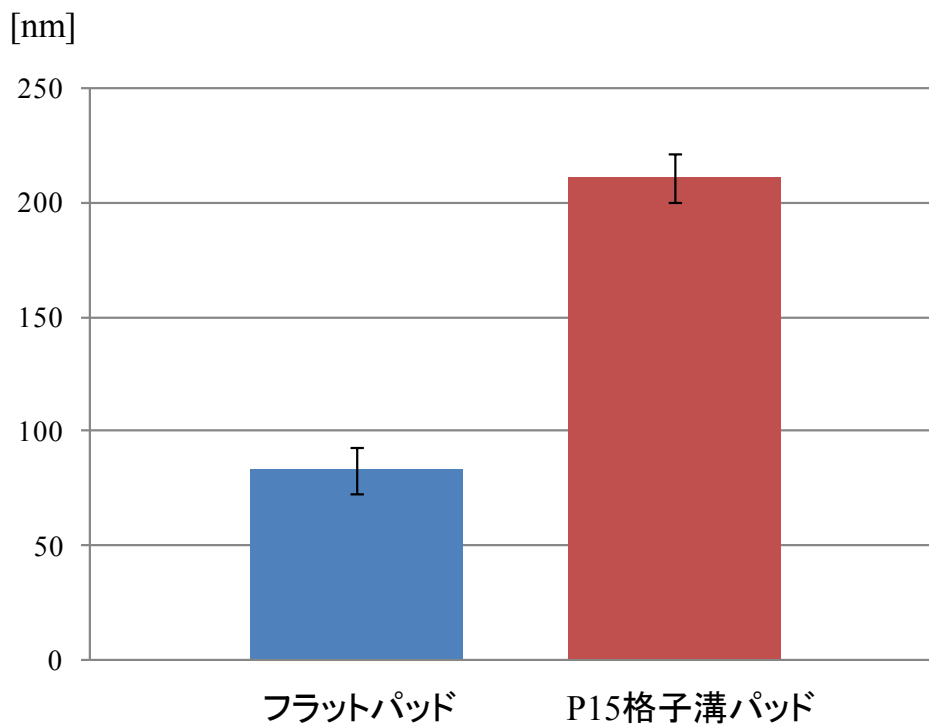


図 3.17 フラットパッドと P15 格子溝パッドを使用した時の研磨量

3.4 結言

第3章ではスラリーの流れの定性的な評価を行い以下のことがわかった。

角形石英ガラスの蛍光剤の流れの可視化実験から2種のポリッシングパッドにおけるスラリーの流れについて考察を行った。フラットパッドの場合、ポリッシングパッド中心から適下されたスラリーの大部分は直接□形状部下へと流入せず、その周辺を沿うように流れ排出される。そして排出されたスラリーがポリッシングパッド上に残留し、その残留したスラリーが徐々に回転した後に□形状部下へと流入することがわかった。しかしながらP15格子溝の場合は異なり、□形状部下へとスラリーが直接流入しやすく短時間で□形状部下へと流入すると考えられる。

フラットパッドとP15格子溝パッドを使用した研磨実験の結果からはP15格子溝パッドの方が研磨量が多いという結果が得られ、スラリーをウェハ面下へと導入する構造が研磨に大きな影響を与えることがわかった。これらの結果から作用粒子数を増大させ研磨レートを向上させるためにはウェハ＝パッド間へスラリーが供給され易い溝形状を有するポリッシングパッドの方が研磨を促進し、スラリーのウェハ面下への流入量と研磨量は相関関係にあると考えられる。

参考文献

- 7.1) K. Kimura, K. Nagayama, Y. Inatsu, P. Khajornrungruang: A lodestar on pad groove pattern design with slurry flow analysis and visualization experiments in CMP process; Proc. International Conference on Planarization/CMP Technology (ICPT), California, USA (2006).

第4章 原子間力顕微鏡を用いたスラリー中の粒子分布状態の考察

4.1 緒言

CMP プロセスにおける材料除去メカニズムを考えるためにはスラリー中の研磨粒子の実際の分布状態を考える必要がある。スラリー中の研磨粒子は液中で3次元的に等間隔で存在していると言われている。しかしながら、現状ではスラリー中の研磨粒子がどのような状態で分布しているかを実際に測定している例はない。スラリー中の研磨粒子が偏って存在すると研磨レートに影響を与えると考えられるため、その分布状態を観察する必要がある。本章では初めにスラリー中の研磨粒子の状態について DLVO 理論に基づいて説明する。研磨粒子による材料除去を考察するために基板上でスラリー中の研磨粒子がどのように分布しているか原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscopy: AFM)を用いて測定実験を行い、スラリー中の研磨粒子の分布モデルを考え、考察を行う。

4.2 スラリー中の研磨粒子の分散

本実験で用いているスラリーは NH_4OH を含んだアルカリ性の電解質溶液にヒュームドシリカ(SiO_2)の研磨粒子を分散させたものであり、コロイド溶液の一種である。電解質溶液中のコロイド粒子は図 4.1 に示す拡散電気二重層構造を基礎に DLVO(Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek)理論^{4.1)4.2)}で説明できる。

液中で帯電した研磨粒子の表面近傍では電気的中性の原理が成立し、表面電荷と当量で反対符号の電荷が研磨粒子表面の周りにイオンの形で集まる。このイオンの内、一部は研磨粒子表面に吸着し、残りは静電引力と熱運動による拡散力とのバランスにより、ある平衡分布を取り図 4.1 に示すように研磨粒子の周りに雲状に存在する。前者を Stern 層、後者を拡散電気二重層と呼んでいる。

研磨粒子または媒体の運動により生じる力が存在しない場合、研磨粒子間に働く相互作用力は電気的反発力と van der Waals 引力の和として表現される。つまり電気的反発力が van der Waals 引力より大きければ研磨粒子は液中で分散し、その逆の場合だと研磨粒子は凝集してしまう。CMP 用のシリカ系スラリーは研磨粒子が凝集し粒径が大きくなってしまふのを防ぐためにアルカリ性の化学物質を加えて安定して分散した状態を保つような処理が施されている。

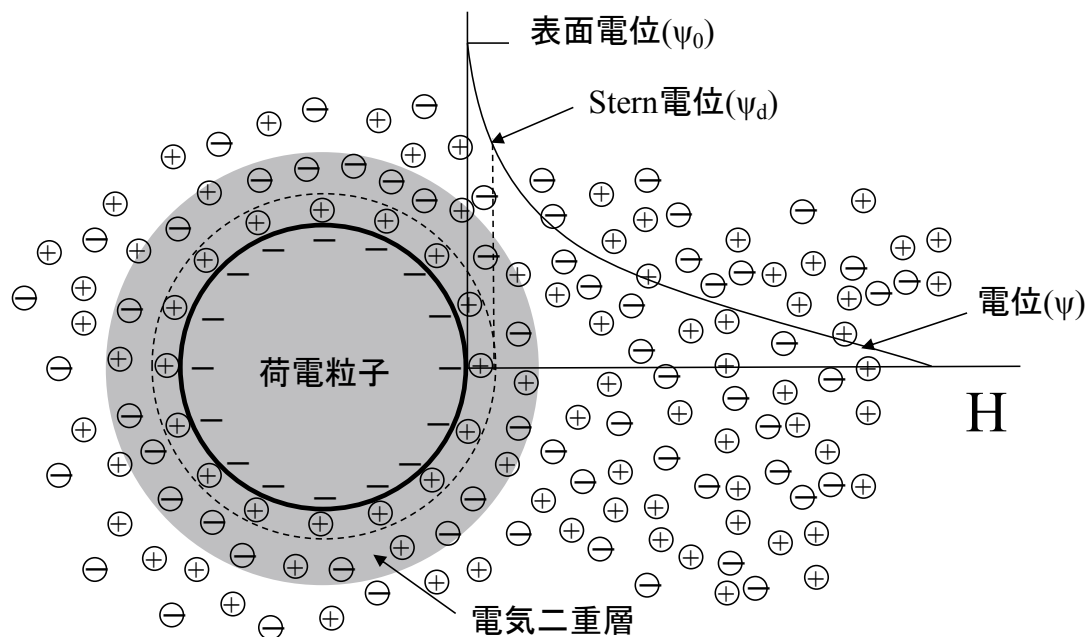


図 4.1 表面電荷と対イオンによる拡散電気二重層構造

4.2.1 スラリー中の粒子分布状態の観察実験の概要

CMP における材料除去メカニズムを考えるためにスラリー中の研磨粒子の分布状態を観察した。実験方法として SiO_2 基板上に SiO_2 粒子を含んだスラリーを滴下し、溶液中での AFM 測定によって、研磨粒子の分布を求めた。なおスラリーとしては（株）触媒化成製の LNA2000 を用いた。また、測定は（株）生体分子計測研究所に依頼しておこなった。

測定装置は Asylum Research 社製の AFM である MFP-3D を用いた。この AFM は液中での測定が可能である。カンチレバーには Si 製のものを用いた。

測定条件は 2 種の条件で測定を行った。スラリー中の研磨粒子は 3 次元的に等間隔で液中に存在していると言われている。その状態で研磨粒子が堆積していくと研磨粒子は稠密な状態で堆積すると考えられる。そこで図 4.2 のように SiO_2 基板上にスラリーを滴下し 10 分経過した後、溶液中を AFM 探針が走査することによって表面の凹凸を計測し研磨粒子の分布を測定した。次にスラリー中の研磨粒子が溶液中に等間隔で存在している状態を再現するために、スラリーの置換を行って溶液中の研磨粒子を測定した。スラリーを基板上に滴下後、10 分経過してから溶液を純水と置換し、スラリー中の研磨粒子の状態を観察した。

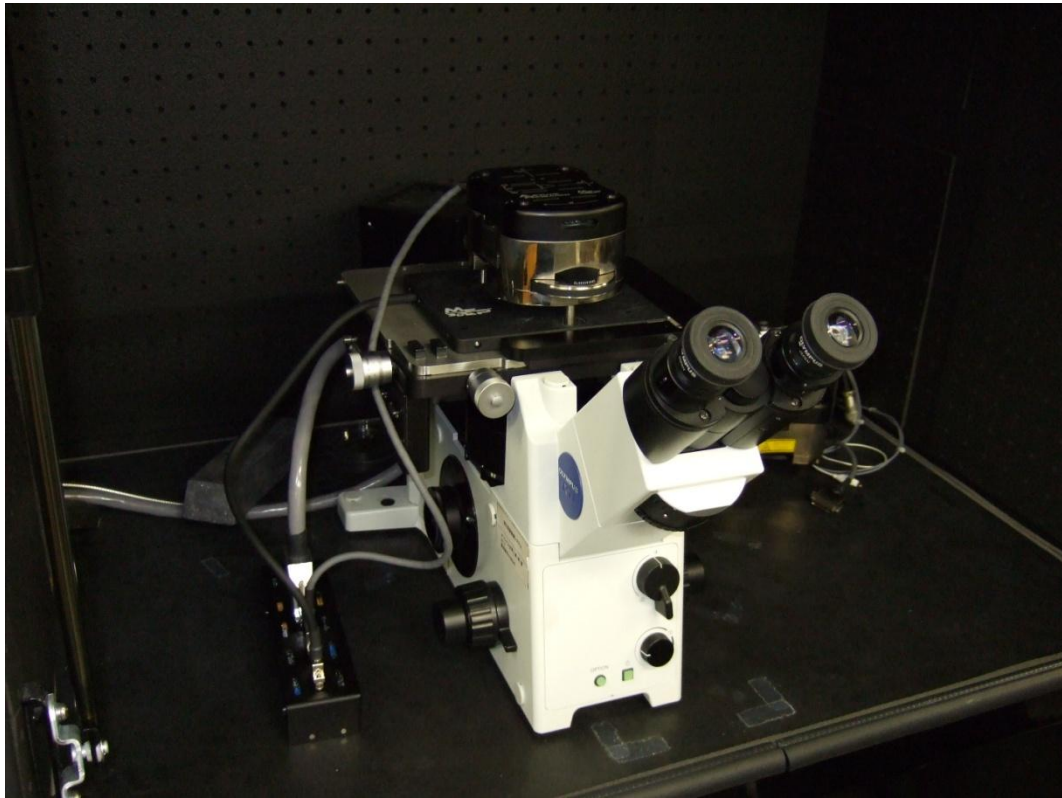


図 4.2 MFP-3D

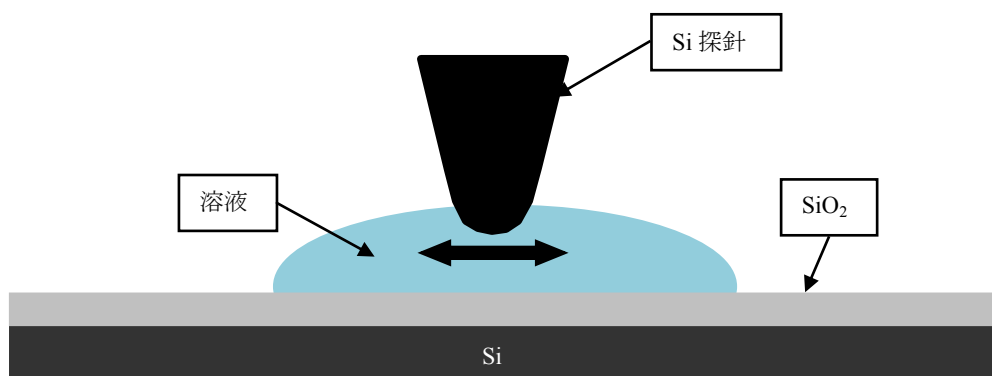


図 4.3 測定概要図

4.2.2 実験結果と考察

測定結果を示す．図 4.4, 図 4.5 は $1\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$ 視野の観察像で，図 4.6, 図 4.7 は $500\text{nm}\times 500\text{nm}$ 視野の観察像である．観察結果からスラリー中の SiO_2 粒子が SiO_2 基板上に堆積している様子が確認できる．図 4.4, 図 4.6 を見てみると，白い斑点模様が映っていることがわかる．図に併記されたスケールからその斑点一つの大きさが約 $20\text{nm}\sim 50\text{nm}$ であることが読み取れる．LNA2000 に含まれる SiO_2 の粒子径が一次粒子径で 14.7nm であり二次粒子径が 23.2nm である．このことから観察像からこの白い斑点が SiO_2 粒子と考えられる．粒子径にバラつきがあるのは研磨粒子の一部が凝集しているためであると考えられる．また，図 4.5, 図 4.7 の高さスケールを見ると， 2nm ほどの凹凸しかないことが分かる．これは研磨粒子を堆積した状態で観察しているため，研磨粒子の上方だけを測定しているのが原因であると考えられる．スラリー中の研磨粒子は時間が経つと，隙間がないほど密な状態で堆積することが分かった．

図 4.8 にスラリーを基板上に滴下後 10 分経過してから溶液を純水と置換し，スラリー中の研磨粒子の分布を測定した結果を示す．スラリー中の研磨粒子はほぼ均等な間隔で堆積していることがわかった．図 4.9 の断面プロファイルを見ても，周期的な曲線が描かれていることから，スラリー中の研磨粒子は一定の間隔で液中に存在しており，その間隔は約 $50\sim 60\text{nm}$ であると考えられる．図 4.8 の画像を 2 値化し粒子径解析を行った結果が図 4.10 である．研磨粒子の粒径は 15nm から 50nm であり．スラリー中に含まれる研磨粒子が溶液の置換によって，大きく変わることなく SiO_2 基板上に存在していることが分かる．

実験結果からスラリーは時間を置くと図 4.11 のように基板上に密に堆積することが分かった．また，スラリーを純水に置換した後に測定を行った結果からスラリー中の研磨粒子はほぼ等間隔で液中に存在していると考えられる．これらの結果からスラリー中の研磨粒子は稠密かつ等しい間隔で液中に存在しており，堆積すると図 4.5, 図 4.7 のように密な状態になると推測する．

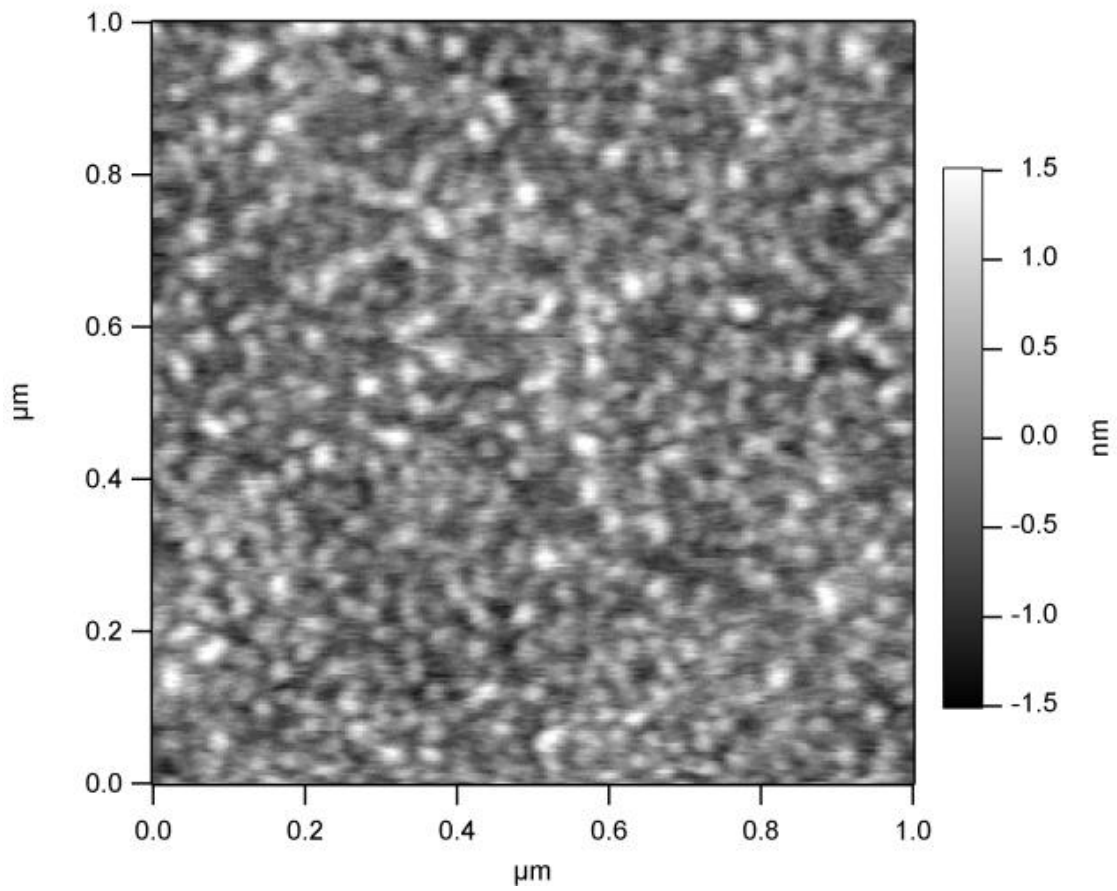


図 4.4 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 視野サイズの観察像

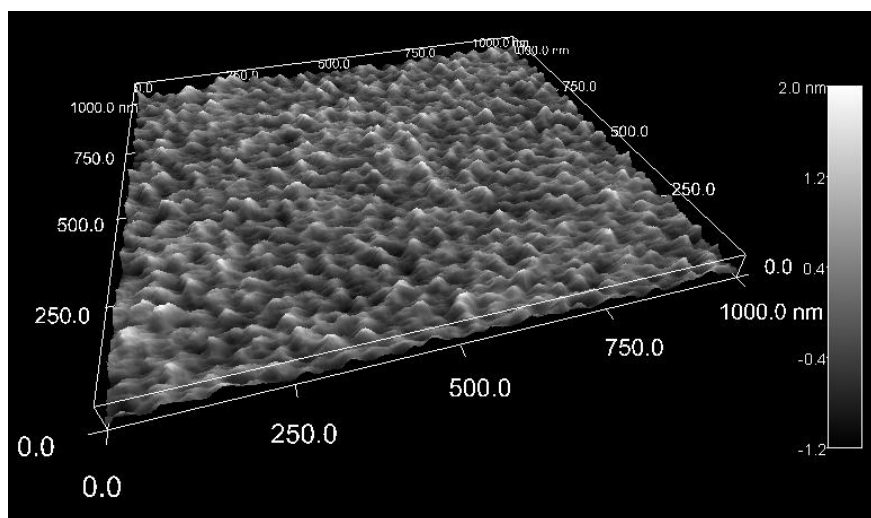


図 4.5 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 視野の三次元画像

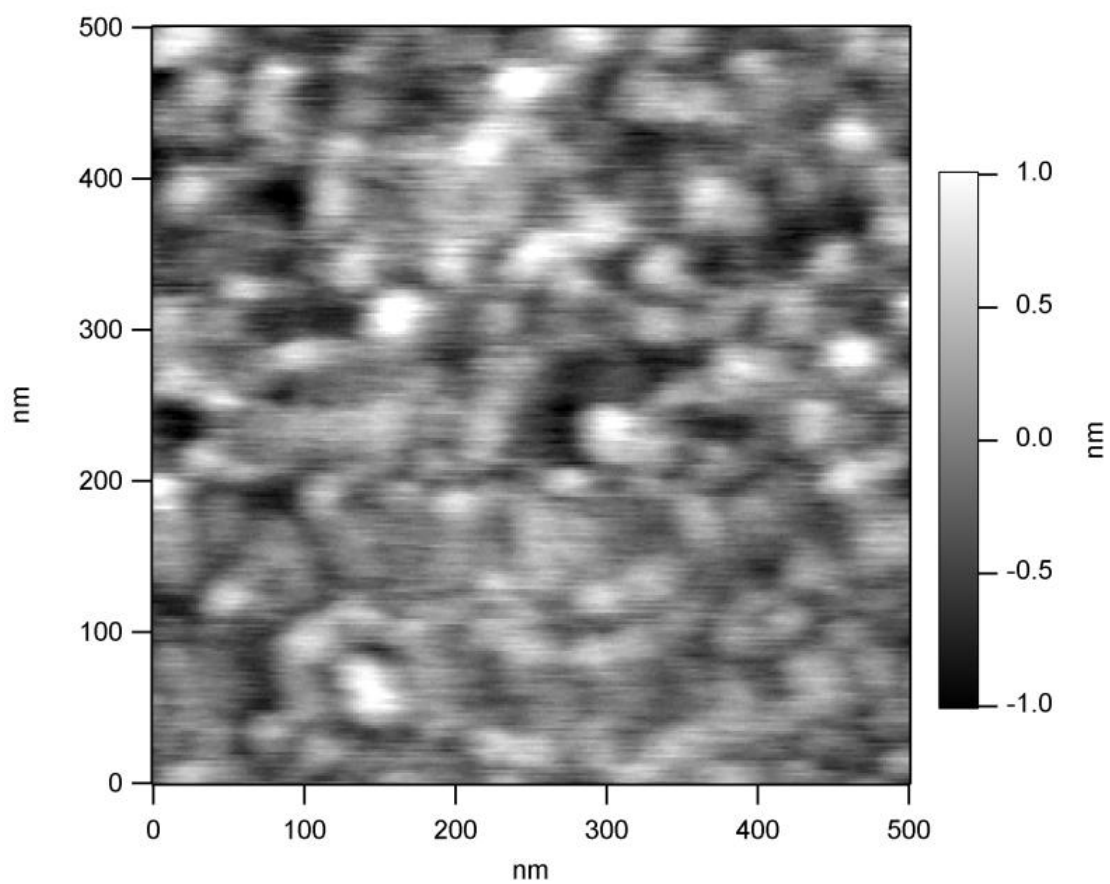


図 4.6 500nm×500nm 視野サイズの観察像

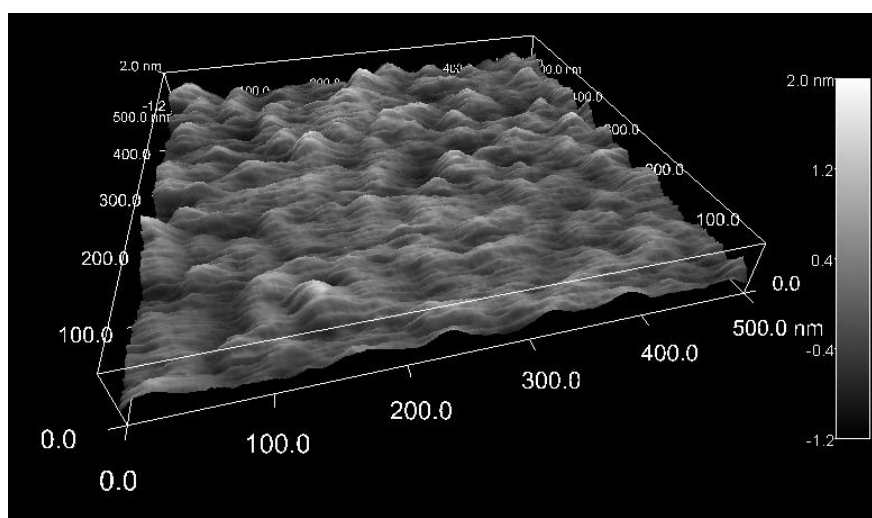


図 4.7 500nm×500nm 視野の三次元画像

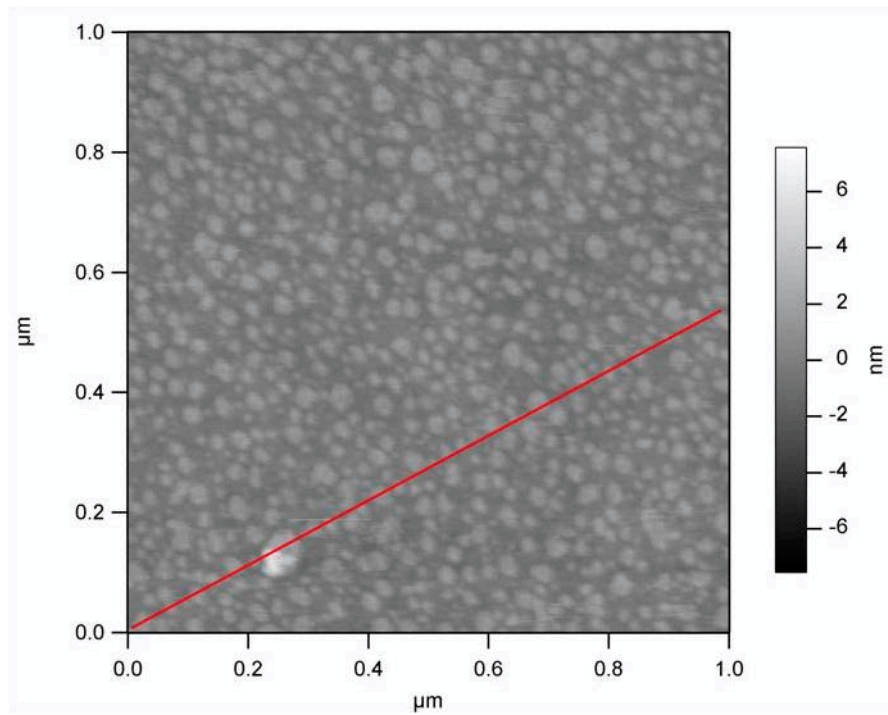


図 4.8 1μm×1μm 視野の 2 次元画像（溶液置換後）

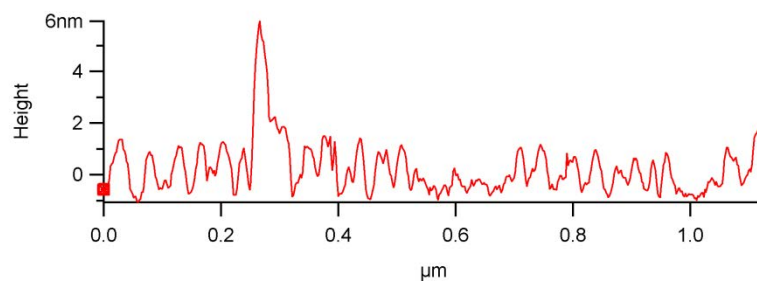


図 4.9 図 4.8 のレッドラインの断面プロファイル

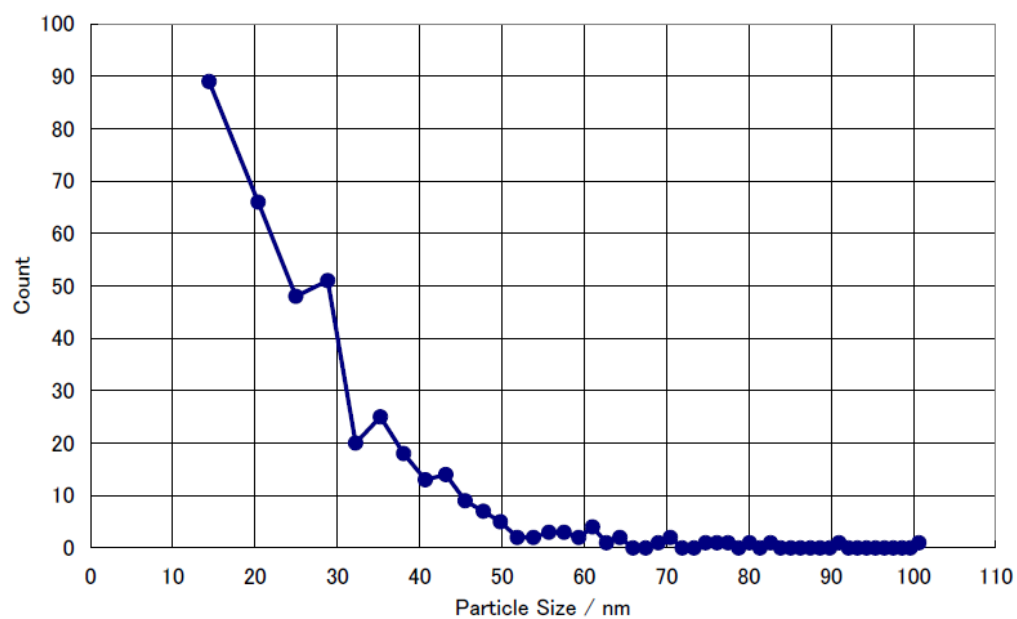


図 4.10 図 4.8 の画像の粒子径解析結果

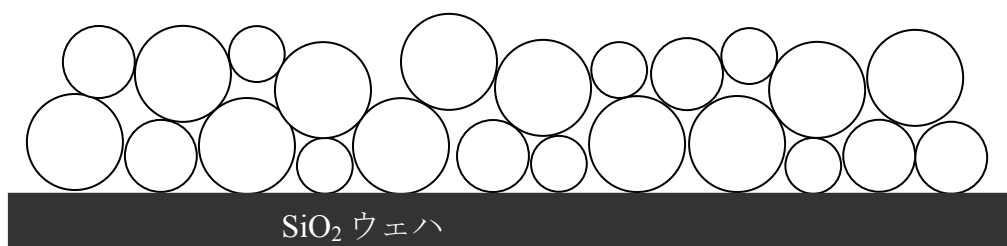


図 4.11 SiO₂ 粒子の堆積状態の予想図

4.3 スラリー中の研磨粒子分布モデル

すべての研磨粒子が同じ粒径であると仮定し，実験結果から，スラリー中の研磨粒子は稠密充填で液中に存在していると考えられるため，ある体積中に面心立方状に等間隔に研磨粒子が並んでいると仮定した．この仮定を基にモデルを構築する．図 4.12 にモデル図を示す．モデルを考える際に使用する式を以下に示す．

$$N = \frac{3Vc}{4\pi r^2 \rho} \quad (1)$$

N : 粒子数, V : 体積[mm], c : スラリー中の粒子濃度[%], r : スラリー中の粒子半径[mm].

ρ : 密度[g/cm³]

この式(1)はある体積中の固体の体積を求め，研磨粒子 1 個の体積を求めることで粒子数を換算するものである．

LNA2000 のスラリー中の粒子濃度は 12.6wt%である．また，スラリー中で安定した状態で存在する二次粒子の粒径が 23.2nm であり，SiO₂ の粒子密度は 2.4g/cm³ である．1000cc 中のスラリー中に含まれる SiO₂ 粒子について計算すると 8.254×10^{18} 個であることがわかった．計算結果から研磨粒子の間隔は最近接距離で 55.6nm，格子定数は 78.7nm となった．よって LNA2000 における研磨粒子の間隔は 55.6nm～78.7nm であることが計算から導き出された．

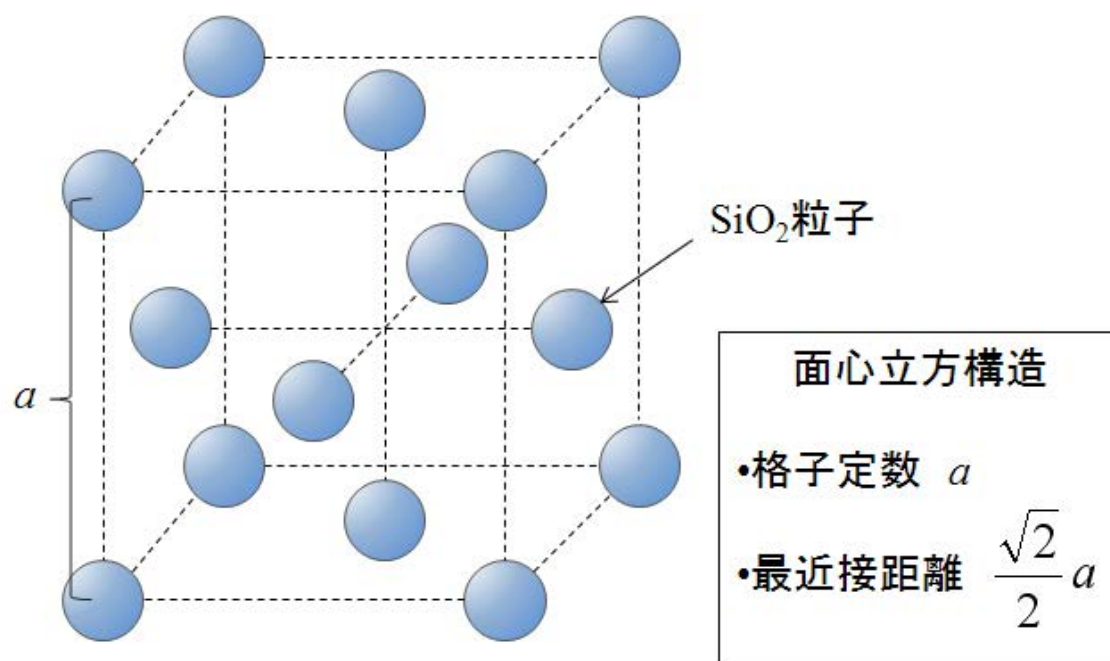


図 4.12 スラリー中の研磨粒子の分布モデル

4.4 結言

スラリー中の研磨粒子分布測定の結果と研磨粒子分布モデルの考察から以下のことが分かった。

- (1) 研磨粒子は稠密に堆積する。また、 SiO_2 基板に研磨粒子を堆積した後、溶液を置換した研磨粒子の分布測定の結果から粒径は $15\sim 50\text{nm}$ であり、 $50\sim 60\text{nm}$ 間隔で並んで存在していることが分かった。
- (2) スラリー中の研磨粒子はすべて同じ粒径で研磨粒子が面心立方構造のような状態で液中に存在すると仮定して計算を行ったモデル式から研磨粒子の間隔は $55.6\text{nm}\sim 78.7\text{nm}$ となることが分かった。

測定結果と計算結果を比較すると、研磨粒子の間隔が十数%の誤差で一致していることがわかる。このことから、スラリー中の研磨粒子は図 4.13 のように粒子間隔 D_p は稠密充填状態でスラリー中の分散状態がそのまま保存されて堆積していると考えられる。

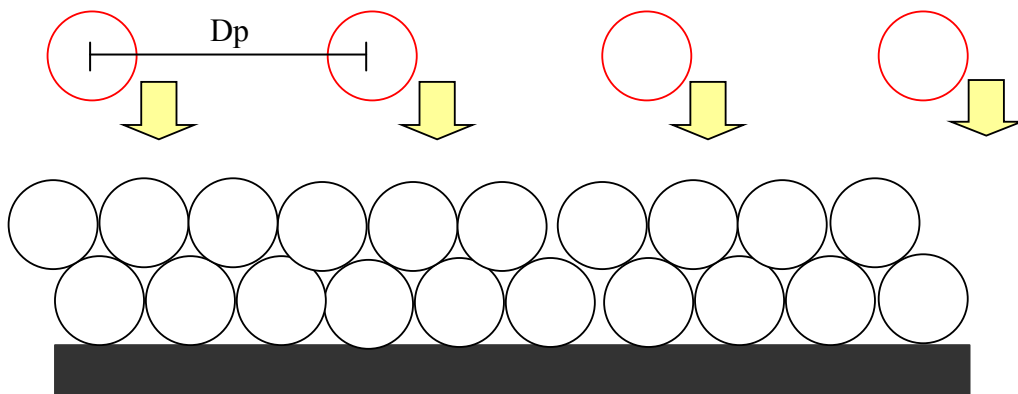


図 4.13 スラリー中の粒子の堆積過程

参考文献

- 4.1) 東谷公： 水溶液中微粒子の凝集・分散メカニズム， MATERIAL STAGE, Vol.2, No.1 (2002), pp39-47.
- 4.2) 東谷公： 液中微粒子の泳動とゼータ電位測定， 粉体工学会誌， 33， pp.582-590.

第 5 章 CMP プロセスにおける材料除去メカニズムの理論的考察

5.1 緒言

第 2 章で従来の材料除去モデルについて説明し，問題点を指摘した．従来のモデルは研磨粒子がポリシングパッドに保持されウェハ表面へと食い込み引っ掻く作用で材料除去が発生していると考えられていた．しかしながら引っ掻きによる材料除去で生じるはずのナノメートルオーダーの加工痕が観察されないなど疑問点があり，CMP 用スラリーに含まれる研磨粒子はナノメートルオーダーの粒子であることから，マイクロメートルオーダーの粒子のモデルである従来の材料除去モデルは説明が不十分であると考えた．そこで本章では，スラリー中の研磨粒子の機能とウェハへの作用について，分子動力学法を用いたシミュレーション，化学反応論的考え方，摩耗現象における凝着除去現象の 3 つの考え方を述べ，CMP 中に発生している材料除去のメカニズムと材料除去現象モデルを理論的に考察する．

5.2 分子動力学法を用いたシミュレーションモデル

このシミュレーションは単結晶シリコンの機械加工によって創成される表面性状を分子動力学シミュレーションを用いて解析したものである^{5.1)}。以下にその内容を引用する。研削やポリシング工程における単結晶シリコンの変形および材料除去機構の解析に用いた分子動力学シミュレーションは、何らかのポテンシャルに基づく相互作用を及ぼし合う原子や分子などの粒子の集合体として物体をモデル化し、そのポテンシャル場での個々の粒子の運動を微小時間ステップごとに詳細に追跡することによって、粒子の集合体である物体の挙動を解析する計算機シミュレーションの一つである。

図 5.1 にシミュレーションする際に用いられる三次元モデルを示す。単結晶シリコンである被削材は固定境界原子、温度調節原子層では層内の平均温度が 293K になるように計算ステップ (2.0fs) ごとに補正してある。研磨粒子には、被削材との相互作用を容易に原子間ポテンシャルに反映させることができるように、シリコン原子との間のポテンシャルが提案されているダイヤモンドを仮想的に用い、剛体としている。温度はシリコン原子の運動エネルギーからデバイの式を用いて変換している。単結晶シリコンは (100) 面を $\langle 100 \rangle$ 方向に加工し、y 軸方向に周期境界条件を適用する。シリコン原子間には角度依存項を考慮した Tefsoff ポテンシャルを、被削材-研磨粒子間の相互作用力には、接触界面は規則的な結晶構造をとっているとは考えられないため、2 体間ポテンシャルである Morse ポテンシャルを用いてある。研磨粒子と被削材のそれぞれの表面原子中心より原子半径分外側の包絡線を最表面と考え、最表面間の距離で切込み深さを定義してある。研削加工のシミュレーションでは図 5.1 に示す単粒研削モデルを用いた。砥粒形状は円筒とし、半径 R は 1.07nm、研削速度は 200m/s、切込み 0.69nm とし、-x 方向に研削を行う。研削によって仕上げられた加工面をポリシングの前加工面とした。ポリシング加工のシミュレーションではスラリー中の遊離砥粒が工作物表面を転がりながら滑ることを想定し、円筒形の砥粒が被削材表面上を速度 200m/s で移動しながら同時に転がるとした。砥粒は、工具-被削材間に働く力を受けて、ニュートンの運動方程式に従って水平軸周りに回転しながら x-z 面で平面運動をする。

図 5.2, 図 5.3 は計算結果である. 図 5.2 はシリコン単結晶上を一定の切り込み深さで固定されたダイヤモンド研磨粒子が移動するという延性モード研削の状態を示している. 研磨粒子の進行方向にはアモルファス状の切りくずが生成され, 移動した後にはアモルファス層が形成されているのがわかる. 図 5.3 はこれらの研削が行われた後アモルファスの表面をダイヤモンド研磨粒子が転動するポリッシングの状態を示している. アモルファス化によって, 分子間結合力が弱まっており, 研磨粒子にシリコン原子が化学結合力によって凝着し材料除去が起きるという可能性を示している.

また高谷, 木村ら^{5,2)}は分子動力学法を用いてシリコンウェハ表面にレーザートラップされたダイヤモンド粒子が接触し直進運動をすることで原子配列数層の材料除去が発生することを示した. この結果は粒子がウェハ表面上で回転を伴わない運動を行ったとしてもウェハ表面の材料を除去していく可能性を示している.

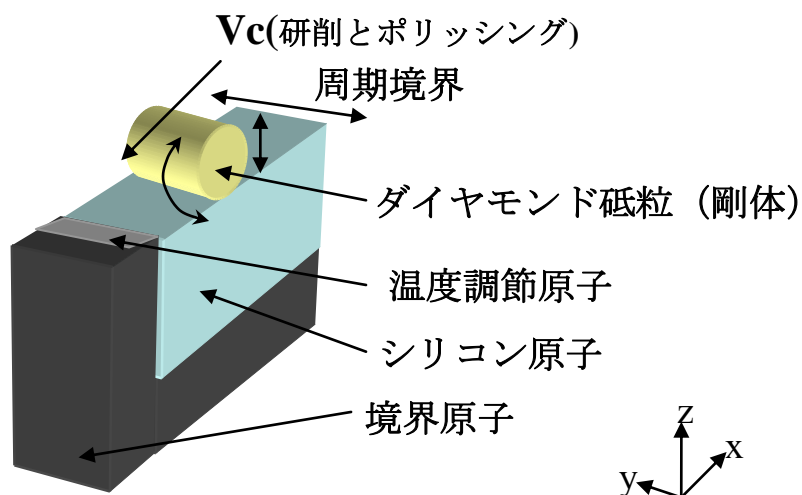


図 5.1 分子動力学シミュレーションによる初期モデル

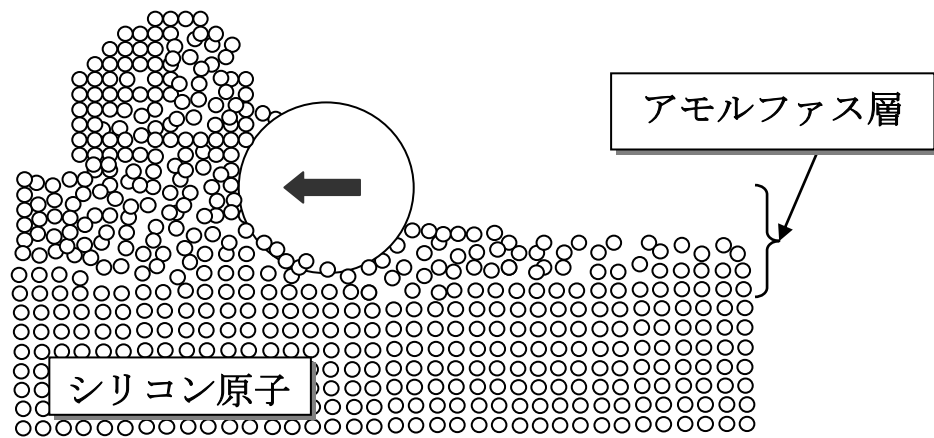


図5.2 延性モード研削

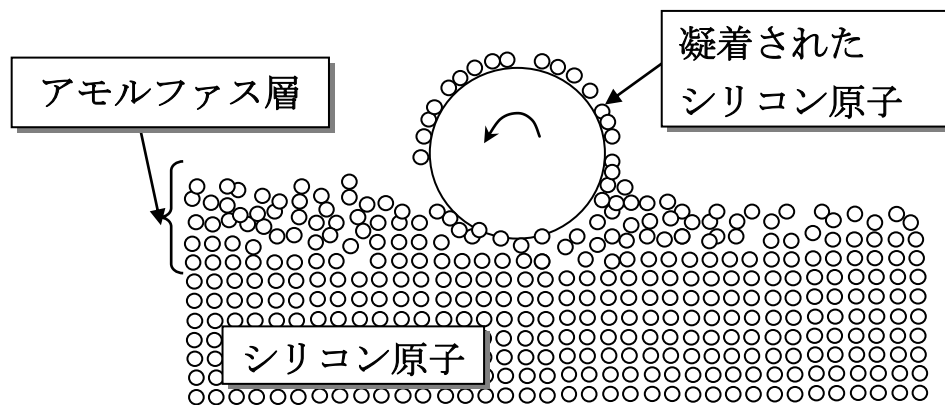
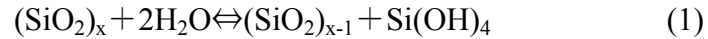


図5.3 メカノケミカルポリッシング

5.3 L. M. Cook の考え

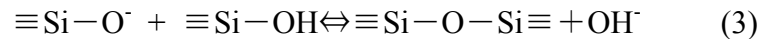
L.M.Cook^{5,3)}は水とガラスの研磨中における化学反応について考察を行っている。ガラス表面の SiO_2 膜は水と反応し、式(1)のような水和反応を生じることで、 $\text{Si}(\text{OH})_4$ を生じる。



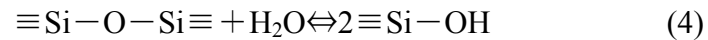
$\text{Si}(\text{OH})_4$ は水和化合物であり、軟質な物質である。式(1)の反応が進む状態を詳しく見ていくと式(2)のような化学反応が発生している。



その後、式(3)に示すような結合反応が発生する。



この時、 $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ で表されるシロキサン結合が生じる。式(3)の逆の反応がシロキサン結合を切断する反応であり、式(4)のように示すことができる。



L.M.Cook はこれらの化学反応式を示し、ガラス表面の材料除去割合は次の 5 つの要因で決定すると述べた。

- i. 水がガラス表面を溶解する割合
- ii. 研磨粒子がガラス表面を押し込んだ際に働く力によるガラスの溶解の割合
- iii. 研磨粒子表面へのガラスの溶解物の吸着量
- iv. ガラス表面へのシリカの再堆積量
- v. 研磨粒子の接触中の水の浸食割合

5.4 摩耗における凝着摩耗現象

トライボロジー的な観点から研磨の材料除去現象を考えていく。スラリー中の粒子がウェハ表面に接触することでウェハ表面の物質が除去される現象はトライボロジーにおける一種の摩耗現象と考えることができる。摩耗には以下に示す代表的な4種類の形態が存在していると言われている^{5.4)5.5)5.6)}。

- (1) 凝着摩耗(adhesive wear)
- (2) アブレシブ摩耗(abrasive wear)
- (3) 腐食摩耗(corrosive wear)
- (4) 表面疲れ(surface fatigue wear)

図5.4^{5.7)}に示すような真実接触面で凝着が生じ凝着部分付近で破断することで表面物質が相手面に移着する。これが繰り返されることで移着物が成長して接触面から排出される摩耗現象を凝着摩耗と呼んでいる。図5.5^{5.8)}にアブレシブ摩耗のイメージ図を示す。アブレシブ摩耗は摩擦面の一方が紙やすりのように硬くて凹凸の激しい場合に生じる摩耗や、2面の間に固い固形粒子が入ったときに生じる摩耗である。腐食摩耗は雰囲気の中に水分、酸などの腐食性物質が存在すると固形異物がなくても生じる摩耗のことである。凝着摩耗によって生じた新生面が雰囲気と反応し反応生成物の層を生じ、その層が2表面の相對運動により容易に除去されることによる凝着摩耗よりも大きな摩耗が腐食摩耗の特徴である。図5.6^{5.9)}に疲れ摩耗のイメージ図を示す。疲れ摩耗は摩擦応力により摩擦面下に空孔が発生し、摩擦の繰り返しによってそれが拡大してクラックに成長し、摩擦面下にある深さからそれ以上の表層部分をはく離させ、それが摩耗粒子として脱落することで生じる摩耗である。

これらの摩耗現象は摩耗の形態を表している。摩擦の分野では摩擦の原因として表面の凹凸による凹凸説と表面物質の凝着による凝着説の2種に別れており、現在では凝着説が広く支持されている^{5.7)}。4つの現象を凹凸説、凝着説に分類すると(2)は凹凸説から考えられる理論であり(1)、(3)、(4)は凝着説から導かれる理論である。凝着による摩耗は発生の過程が細部までモデル化されている考え方^{5.7)}であり、研磨中にこの現象が発生している可能性が高い。

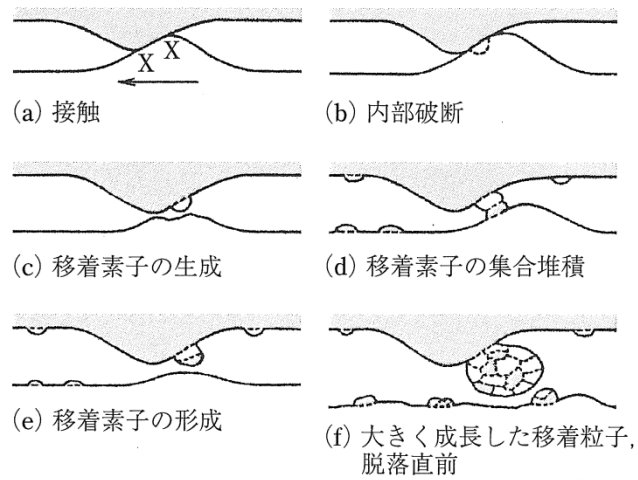


図 5.4 凝着による移着成長モデル

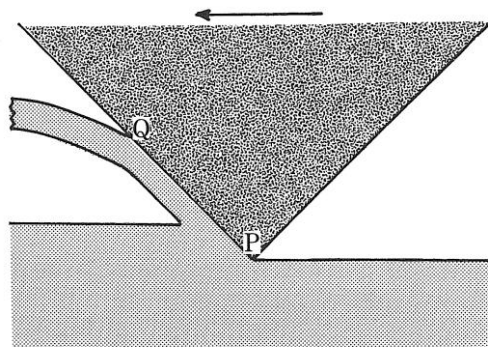


図 5.5 運動する物体が相手面と幾何学的に干渉した場合の切削

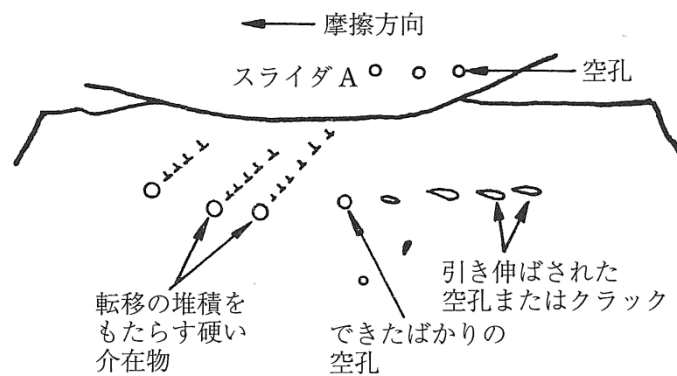


図 5.6 Suh による「疲れ」の理論

5.5 凝着除去モデルの提案

分子動力学シミュレーションの結果，化学反応論的考え方，凝着摩耗の考え方を踏まえて，CMP 中の材料除去モデルを考える．分子動力学シミュレーションからは研磨粒子がウェハ表面の原子と結合しウェハ表面の原子を除去するという結果であった．これはスラリー中の研磨粒子がウェハ表面と接触し，結合することで凝着による表面物質の除去が行われていると考えられる．化学反応論的考え方からはスラリー中の溶液がウェハ表面と研磨粒子表面に作用し，化学結合を促進していると考えられ，スラリー溶液が研磨粒子の凝着作用を強めていると考えられる．さらにスラリー中の化学成分がウェハ表面に作用しアモルファス状になった酸化膜ウェハ表面の結合が確率論的に破断されることによって材料除去が発生していると考えられる．また凝着摩耗の考え方から移着素子を研磨粒子と考えると，凝着摩耗のような現象が発生していると考えられる．図 5.7 に材料除去のモデル図を示す．スラリー中の研磨粒子は化学溶液によりウェハ表面へと吸着しやすくなっており，ウェハ表面へと引き寄せられる．その後，研磨粒子はウェハ表面に接触すると表面原子と結合する．そしてこの状態で研磨粒子がウェハ表面から離れるとき，ウェハ表面の結合力の弱い部分が確率的に破断し研磨粒子にウェハ表面物質が凝着し除去される．このモデルを CMP 中の材料除去メカニズムの現象モデルと考え，凝着除去モデルと呼ぶ．

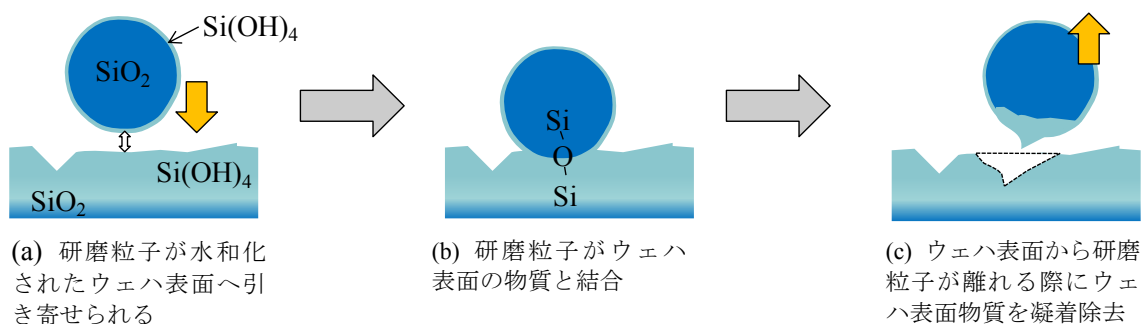


図 5.7 研磨粒子による凝着除去モデル

5.6 結言

本章では分子動力学によるシミュレーション，ガラス研磨中の化学反応論，摩耗現象における凝着摩耗の 3 つの考え方を示し，それらを基礎として CMP 中の材料除去モデルを考えた．CMP 中ではスラリー中の研磨粒子とウェハ表面との間に凝着による除去作用が働いていると推測し，その現象モデルを提案した．提案したモデルを検証するために実験を行い，材料除去メカニズムを考える必要があると考えられる．

参考文献

- 5.1) 田中宏明，島田尚一，井川直哉：分子動力学シミュレーションによる単結晶シリコン理想表面生成プロセスの予測，砥粒加工学会誌，Vol.45 No.4 (2001)，APR. 175-180.
- 5.2) 高谷裕浩，河野秀逸，三好隆志，木村景一：分子動力学法による光放射圧マイクロ加工現象の解析，砥粒加工学会誌，Vol.47，No.12 (2003)，DEC.677-683.
- 5.3) L. M. Cook: Chemical Process in Glass polishing, J. Non-Crystalline Solids 120(1990).
- 5.4) 竹内榮一 著：材料技術者のためのトライボロジー，槇書店 (2002).
- 5.5) 山本雄二，兼田楨宏 著：トライボロジー，理工学社 (1998).
- 5.6) 岡本純三，中山景次，佐藤昌夫 著：トライボロジー入門，幸書房 (1990).
- 5.7) 笹田直 著：摩耗，養賢堂 (2008).
- 5.8) 笹田直：摩擦による固体表面の損傷－とくに凝着摩耗について－，日本機械学会誌，75 (1972) pp.905-912.
- 5.9) N. P. Suh: The delamination theory of wear, Wear, 25 (1973) pp.111-124.

第6章 化学反応層の性質と研磨粒子の機能

6.1 緒言

CMP における材料除去においては、第5章に示す研磨粒子による凝着除去現象が起き、ウェハ表面の加工が発生すると考えられる。本章では提案した凝着除去現象が妥当なものであるか原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscopy: AFM)を使い検証を行う。AFM を使い探針先端を CMP 中の研磨粒子と見做して模擬実験を行った研究成果^{6.1)6.2)}も報告されており、AFM を使った分析方法は有効であると言える。

初めに AFM の探針先端をスラリー中の研磨粒子と見做し、フォースカーブ法を用いて、ウェハとの間に働く力について観察した。次に得られたフォースカーブを基礎として AFM を使って SiO₂ ウェハ表面の化学反応層のヤング率を調べた。最後に AFM を使い、SiO₂ ウェハ表面への押し込み実験を行い、探針先端の観察と元素分析を行うことで凝着除去による材料除去が発生しているか検証を行った。

6.2 研磨粒子とウェハ間の相互作用力の測定

6.2.1 実験概要

フォースカーブ測定とは AFM の探針を一定速度で試料表面に移動させサンプル表面に押し込み、引き離す過程で探針先端とサンプルとの間に生じる力を測定する方法である。図 6.1 に模式的にフォースカーブ法とフォースカーブを示す。図 6.1 のグラフがフォースカーブと呼ばれるグラフであり、縦軸が探針と試料表面との間に働く力を表わし、斥力を正としている。横軸は探針と試料表面との間の距離を表わしており、探針と試料表面が近づくにつれて 0 に近づく。①～③が押し込みの過程を表わし、④～⑤は押し込んだ後の引き離しの過程を表わしている。探針に力が作用していない状態が①の状態である。①の状態から徐々に探針を試料表面に近付けていくと、探針と試料表面との間に働く吸着力（主に van der Waals 力）によって瞬間的に探針が引き寄せられる。この状態が②の状態である。その後、探針が接触し設定しておいた力に達した状態が③である。設定した力に達した後、探針を試料表面から引き離し始める。その過程が④であり、探針が試料表面から離れる際に結合力が発生し、②の過程で働いた引力よりも強い力が発生する。⑤の状態が探針と試料との間に働く力が存在しない状態であり、①の状態と同じである。このような過程を経て、フォースカーブを測定することができる。

CMP 中の研磨粒子の作用を模擬するために液中でフォースカーブ測定を行った。測定装置は第 4 章で示した Asylum Research 社製 MFP-3D を使用し、探針には OLYMPUS 社製 RC800 を用いた。探針は窒化シリコン(Si_3N_4)で製作されており、探針先端にはスパッタリング装置で膜厚 10nm ほどの SiO_2 を堆積させたものを用いている。図 6.2 に SEM 観察像を示す。先端の曲率半径は堆積させた SiO_2 層を考慮すると 20nm 以下である。試料には酸化膜 Si ウェハを用いた。CMP 用スラリーに含まれるアルカリ成分が研磨粒子とウェハ表面との相互作用に及ぼす影響を調べるため、超純水並みの純度である純水とその純水にアルカリ成分である NH_4OH を加えた溶液（以下、 NH_4OH 溶液）の 2 種類の溶液を使用した。それぞれの溶液で 5 回実験を行い吸着力と結合力を求めた。

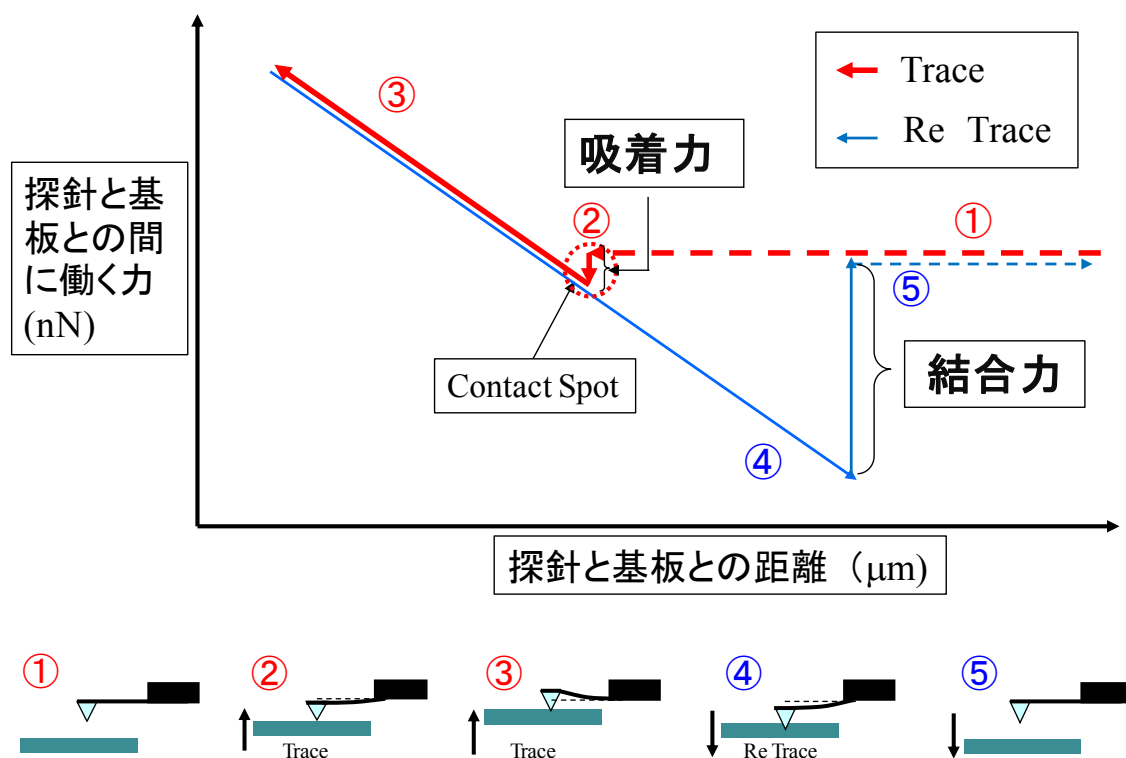


図 6.1 フォースカーブ法とフォースカーブの模式図

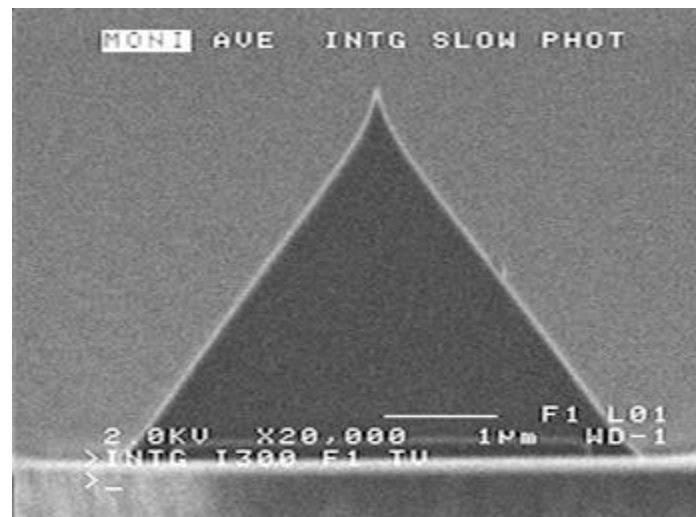
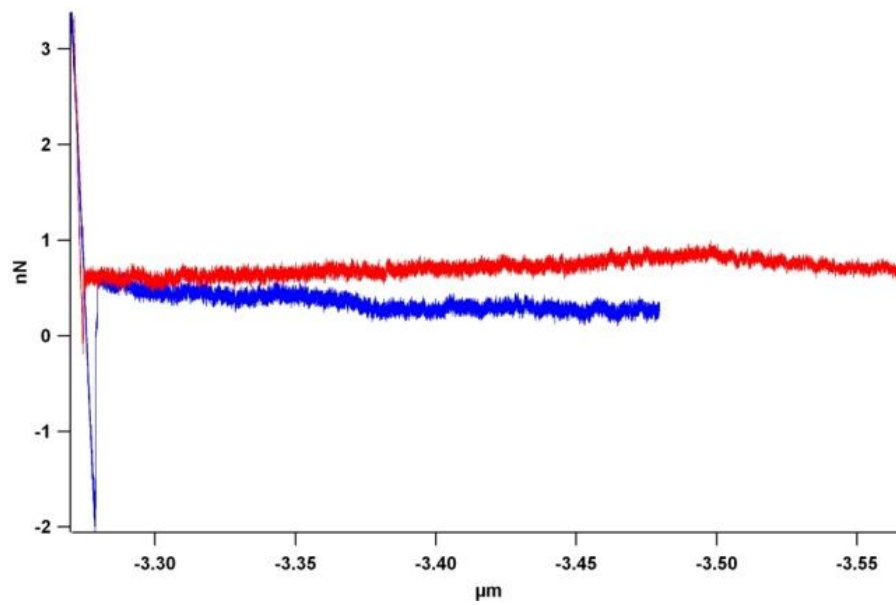


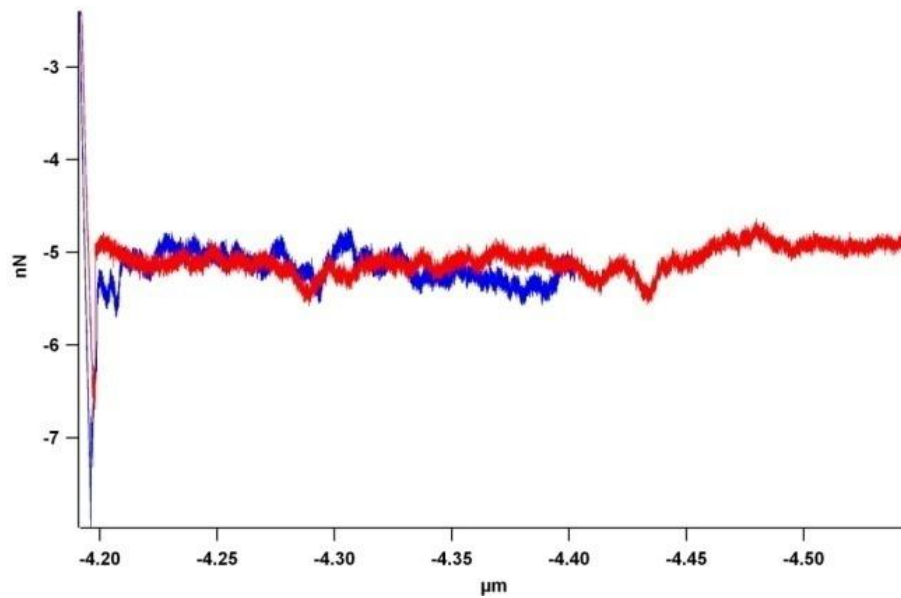
図 6.2 SiO₂ 層を堆積させた探針先端の SEM 観察像

6.2.1 実験結果と考察

図 6.3 にフォースカーブ測定を行った結果の一部を示す．図 6.3(a)が純水中での測定結果で図 6.3(b)が NH_4OH 溶液中での結果である．(a)と(b)を比べると(b)のグラフはノイズが多くみられる．これは NH_4OH 溶液中ではイオン化した OH 基が純水中よりも多く反応性が高いため探針に微小な力が多方向から作用しているのが原因だと考えられる．図 6.4 に吸着力のグラフ，図 6.5 に結合力のグラフを示す．吸着力は純水中で $1.7 \pm 0.1 \text{ nN}$ ， NH_4OH 溶液中で $1.9 \pm 0.1 \text{ nN}$ だった．結合力は純水中で $2.9 \pm 0.06 \text{ nN}$ ， NH_4OH 溶液中で $3.34 \pm 0.1 \text{ nN}$ だった．実験結果から純水中よりも NH_4OH 溶液中の方が吸着力が強く結合力も強いという結果が得られた．これは溶液中に存在する OH 基が吸着力と結合力を増大させており，アルカリ成分を含む CMP 用スラリー中では研磨粒子のウェハ表面への吸着力が強く，結合力も強いと考えられる．



(a)純水中でのフォースカーブ



(b) NH_4OH 溶液中でのフォースカーブ

図 6.3 溶液中でのフォースカーブ

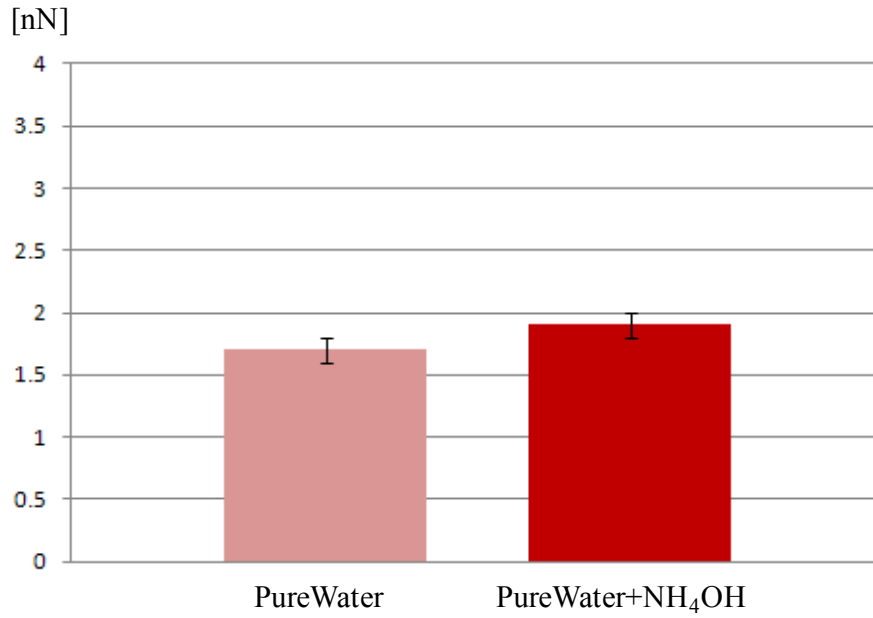


図 6.4 吸着力の平均値

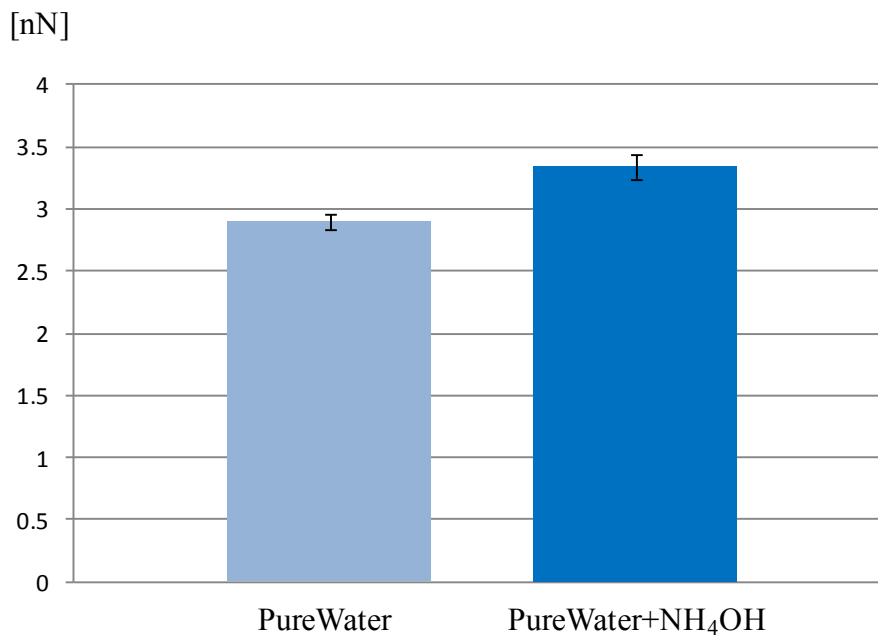


図 6.5 結合力の平均値

6.3 AFM を用いた化学反応層のヤング率測定

6.3.1 実験概要

6.2 で示した AFM を用いたフォースカーブ測定により得られる Trace Curve を解析することで半定量的に溶液中での化学反応層のヤング率を解析することができる^{6.3)}。ヤング率解析を行う場合、図 6.1③の状態を観察される Trace Curve を使って解析を行う。液中での SiO₂ ウェハ表面には軟質な化学反応層が形成されていると考えられている。探針の先端は半径約 20nm ほどの半球状であるため、ヘルツ接触理論から導きだせる式(1)を使ってヤング率を測定することができる^{6.4)6.5)6.6)}。

$$F = \frac{4}{3} \frac{E\sqrt{R}}{1-\nu^2} \delta^{3/2} \quad (1)$$

F : 負荷[N], δ : ひずみ[m], E : ヤング率[N/m²], ν : ポアソン比, R : カンチレバー先端曲率半径[m]

この数式は軟質な試料表面と弾性球が接触した際の関係式である。試料表面はほぼ非圧縮性であると考えポアソン比は 0.5 と仮定している^{6.6)}。

解析方法を図 6.6 に示す。試料表面が軟質だとフォースカーブ測定で得られた Trace Curve は図 6.6 の拡大部に示すようにカーブを描く。このカーブの形状にフィッティングするようなヤング率をモデル式に代入することで値を算出した。フォースカーブは 6.2 で示した純水中と NH₄OH 中で測定を行った結果を使用した。

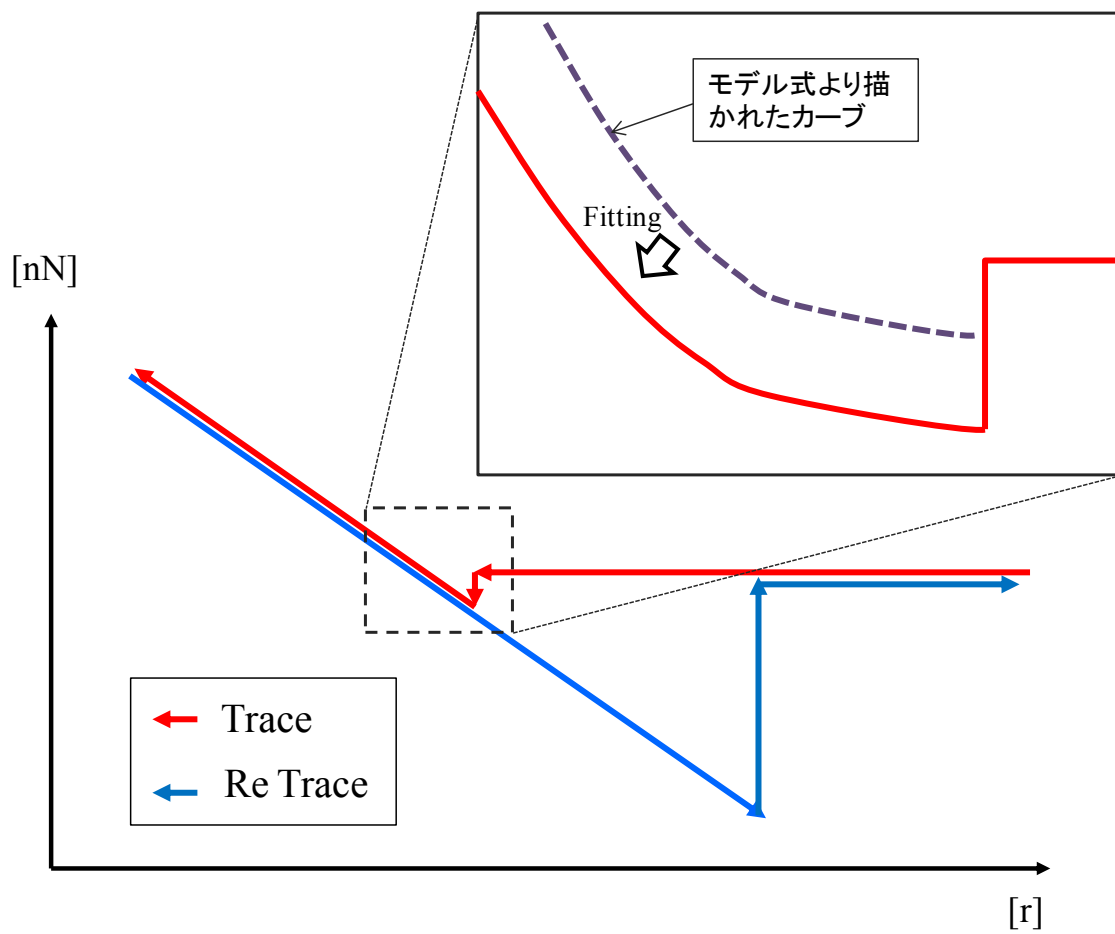


図 6.6 Trace Curve の拡大図とモデル式から得られたカーブ

6.3.2 実験結果と考察

フォースカーブを拡大したところ純水中、 NH_4OH 溶液中ともに曲線となっており SiO_2 ウェハ表面に軟質な化学反応層が形成されていることが確認できた。モデル式を用いて値を算出したところ純水中ではヤング率は $103 \pm 29 \text{MPa}$ であり、 NH_4OH 溶液中では $70 \pm 12 \text{MPa}$ であった。この結果から純水中よりもスラリー溶液中の方が化学反応層が軟質であることが分かった。これは NH_4OH がスラリー中に含まれることで OH 基が増大し $\text{Si}(\text{OH})_4$ が形成され易くなり、より軟質な化学反応層が NH_4OH 溶液中で形成されたためと考えられる。

6.3 AFM を用いた研磨粒子の機能の観察

6.3.1 実験概要

5 章で示したスラリー中の研磨粒子による凝着除去現象が発生するか確認するため AFM 探針先端を研磨粒子と見做して、 SiO_2 ウェハ表面への押し込み実験を行った。実験では AFM として Dimension3000(Digital Instrument)を用いた。図 6.7 に装置の写真を示す。AFM 探針は Veeco 社製 DNP-S と OLYMPUS 社製 OMCL-TR800PSA を使用した。図 6.8 に使用前の AFM 先端の SEM 画像を示す。これらのカンチレバー上にはピラミッド型の窒化シリコン(Si_3N_4)が形成されている。バネ定数 0.57N/m の探針を使用し、探針先端の曲率半径は $10\sim 40\text{nm}$ である。この曲率半径は酸化膜 CMP で使用されるスラリー中の研磨粒子の半径と同等である。これらのカンチレバーは熱酸化処理が施されており、 SiO_2 層で覆われている。試料は SiO_2 ウェハを使用した。実験方法は図 6.9 に示す。実験の手順は以下の通りである。

- I. 探針を液中に入れ、ウェハに近付ける。
- II. 先端を SiO_2 ウェハに押し付ける。
- III. SiO_2 ウェハから探針を離した後、探針を分析する。

AFM 探針は溶液中で 5 回接触させ、実験後に探針を電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)とエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置(Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer: EDX)で分析を行った。実験には CMP 用スラリーに含まれるアルカリ成分が探針先端へ及ぼす影響と pH 値が変化した場合の凝着の有無を調べるため、pH7,8.5,10 の溶液を作成し使用した。pH7 の溶液には純水を使い、pH8.5 の溶液には pH 値を調整した KOH 溶液と NH_4OH 溶液の 2 種類を用意した。pH10 の溶液も pH8.5 と同様に KOH と NH_4OH の溶液を用意した。

スラリー中の研磨粒子はブラウン運動をしていると考えられる^{6,7)}。そのため AFM カンチレバーを SiO_2 ウェハに押し付ける際には、探針が動いている状態で接触させるのが望ましい。そこで AFM の Dynamic-mode^{6,8)}で探針を接触させた。Dynamic-mode とは探針を探針の共振周波数で振動させるモードである。



図 6.7 Dimension3000

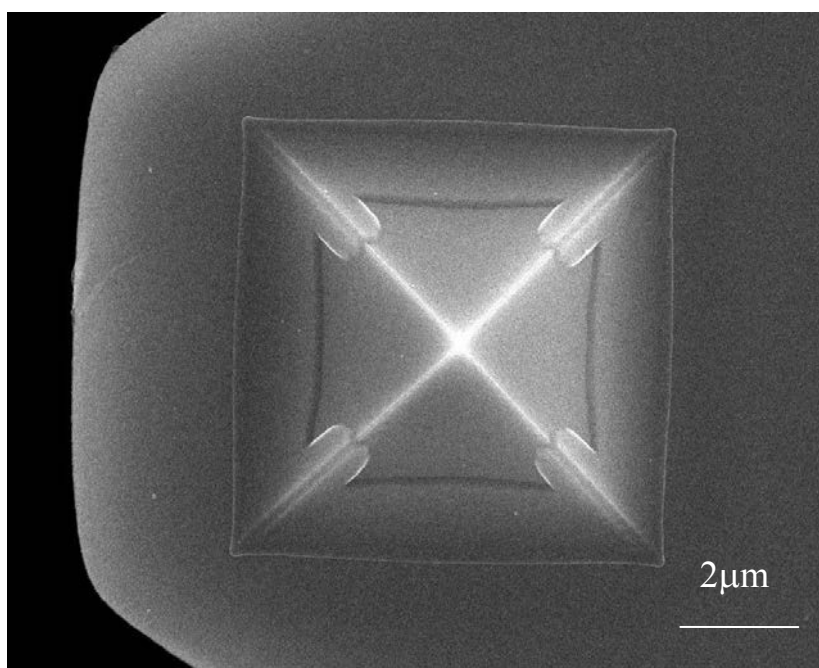


図 6.8 AFM 探針先端の SEM 画像

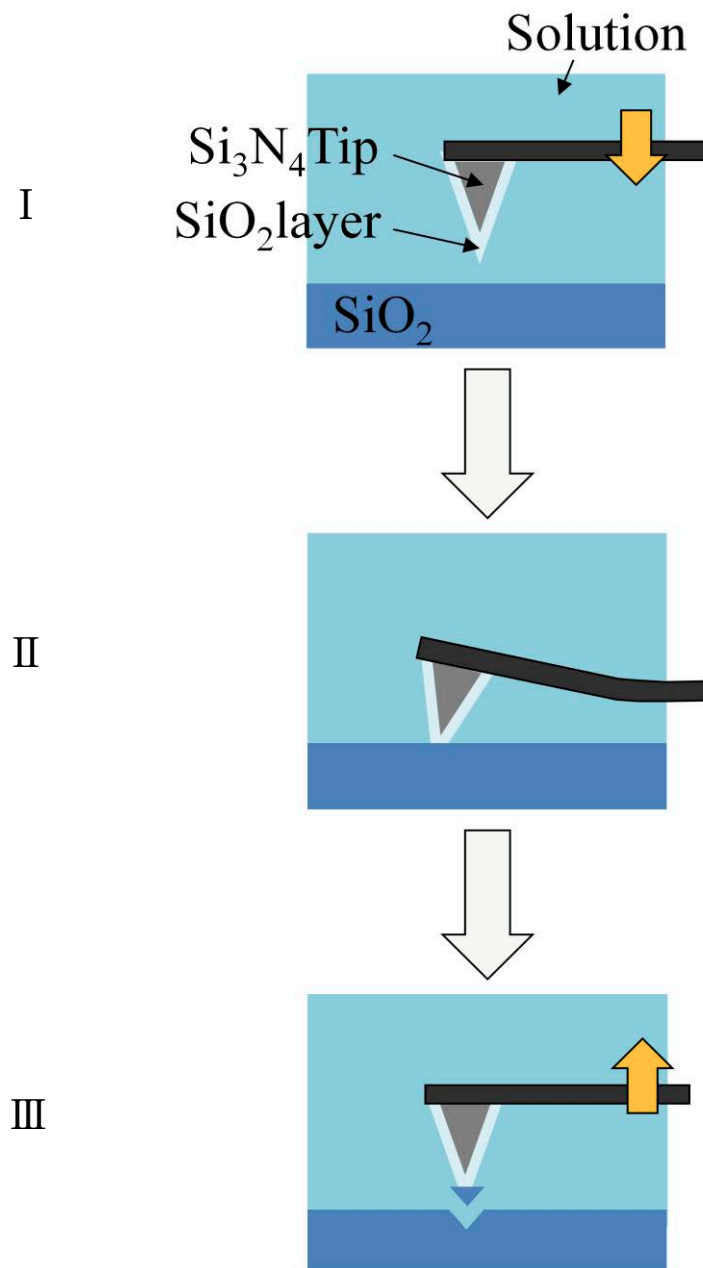


図 6.9 AFM による実験手順

6.3.2 実験結果と考察

pH7の純水溶液中での実験結果を図6.10に示す．図の中心部が探針先端である．図6.10から探針先端に付着物が確認できる．

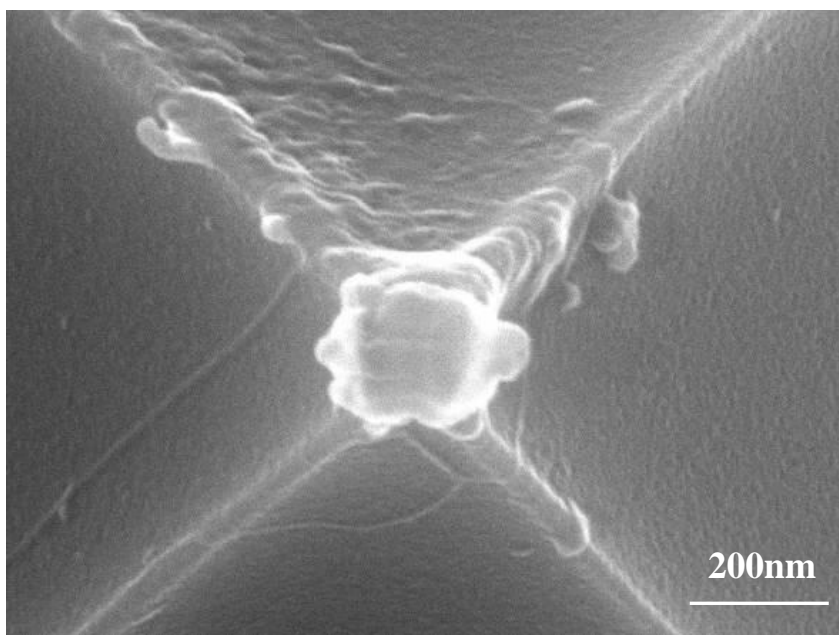


図 6.10 pH7 の純水溶液中で押し込み実験を行った後の探針の SEM 観察像

pH8.5の溶液中での実験結果を図6.11, 図6.12に示す. 図6.11はKOH溶液中での実験結果であり, 図6.12は NH_4OH 溶液中での実験結果である. 図6.10の探針先端と同様に図6.11, 図6.12共に探針先端に付着物が確認できる. また, 化学種が異なる溶液でも微小な物質が付着することがわかった.

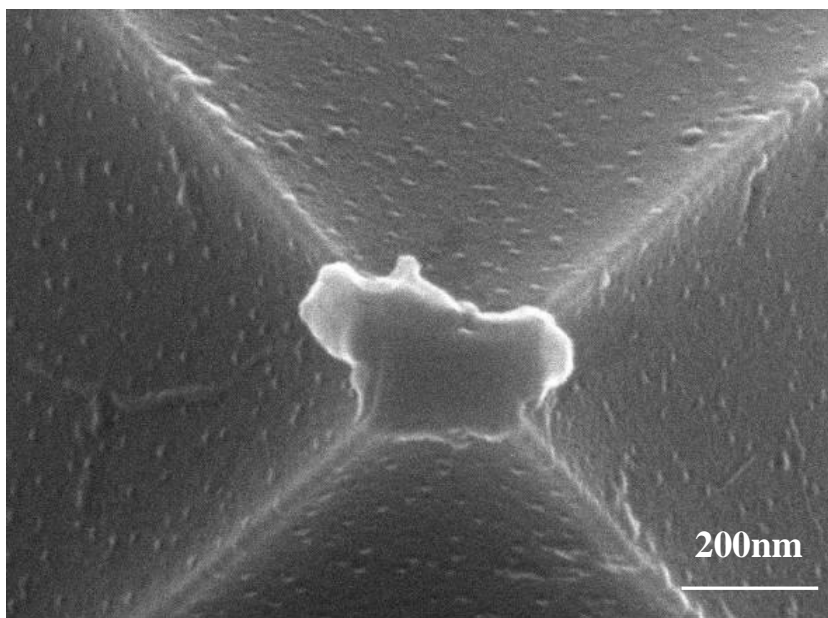


図 6.11 pH8.5 の KOH 溶液中で押し込み実験後の探針の SEM 観察像

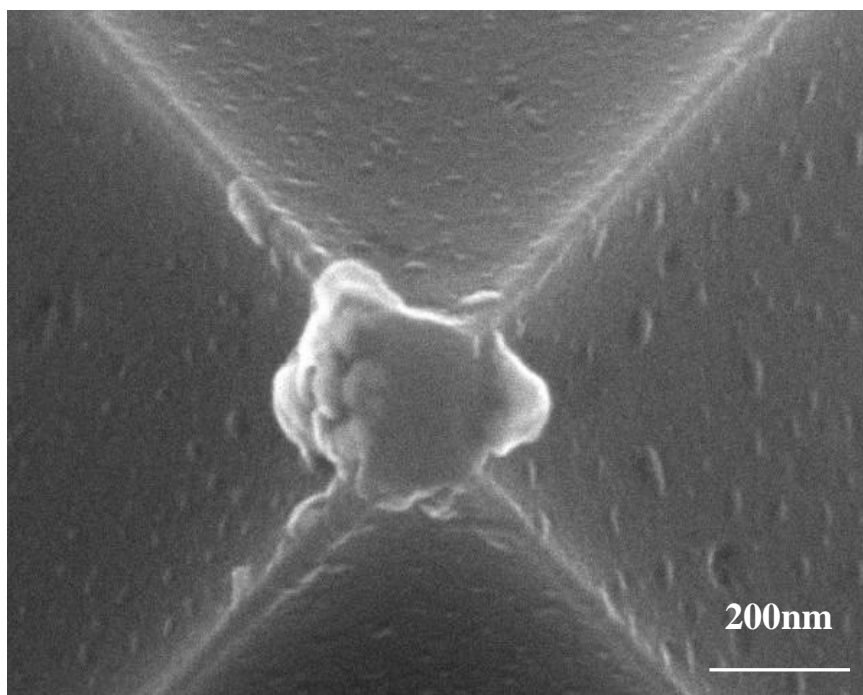


図 6.12 pH8.5 の NH_4OH 溶液中で押し込み実験後の探針の SEM 観察像

pH10の溶液中での実験結果を図6.13, 図6.14に示す. 図6.13はKOH溶液中での実験結果である. 図6.14は NH_4OH の溶液中での実験結果である. pH7, pH8.5の場合と同様に図6.13, 図6.14とも探針先端に付着物が確認でき, 化学種の違いによる付着の様子もpH8.5の場合と同様であることが確認できた.

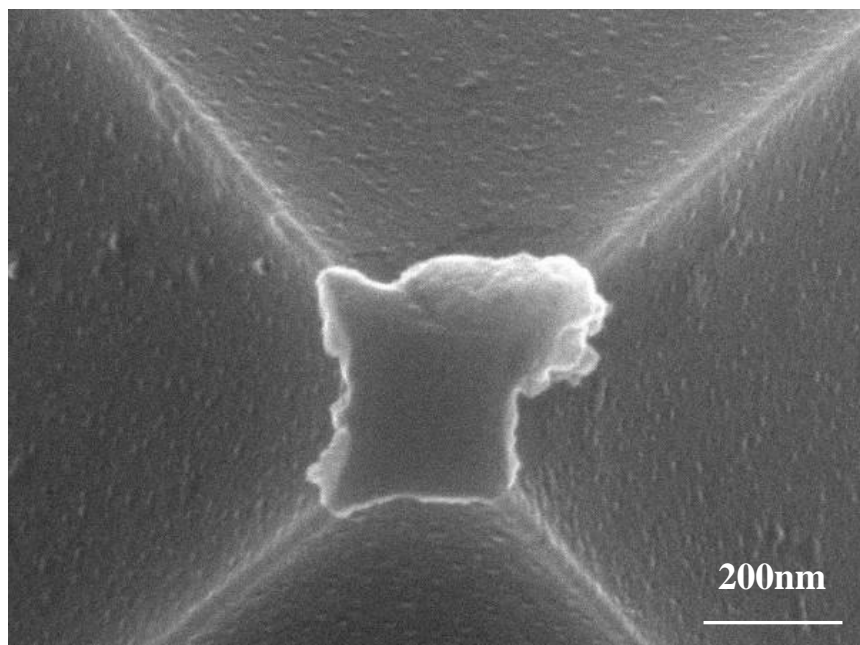


図 6.13 pH10 の KOH 溶液中で押し込み実験後の探針の SEM 観察像

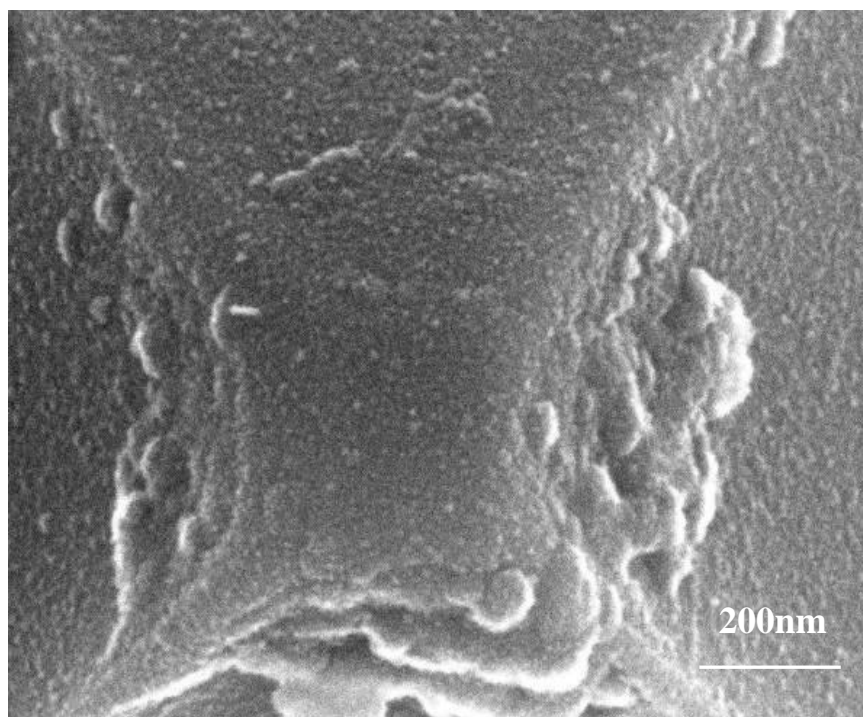
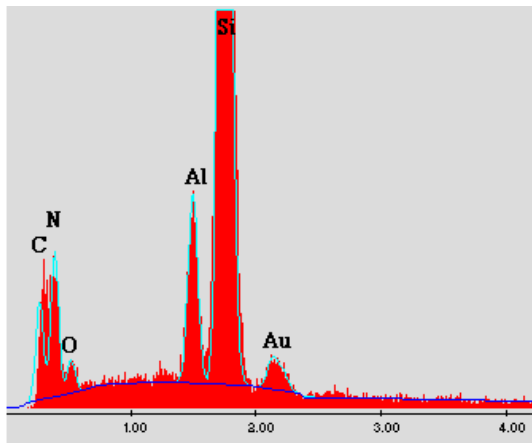


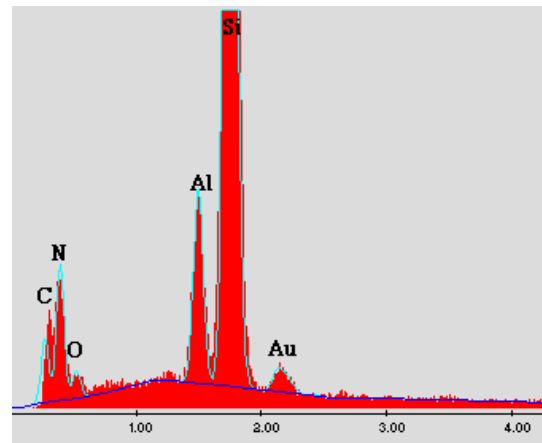
図 6.14 pH10 の NH_4OH 溶液中で押し込み実験後の探針の SEM 観察像

図6.15にEDXによる探針先端の分析結果を示す。図6.15(a)は未使用のAFM先端の分析結果である。図6.15(b)～(f)は実験後のAFM先端の分析結果である。図6.15の結果から検出された原子について述べる。SiとN原子は探針の材質である。Au原子はAFMカンチレバーの裏面のコーティングの一部が先端に付着しているために検出されている。Al原子はEDXシステム内の試料台の元素である。C原子はEDXによる観察のためのカーボン蒸着を行った際に付着したものを示している。O原子は熱酸化によってコーティングされたSiO₂である。図6.15 (a) と図6.15(b)～(f)を比較するとこれらの結果はすべて類似した結果である。この結果から未使用の探針先端の組成が実験後の探針先端とほとんど変わらないことわかる。これらの結果はダストや他の物質が実験後の探針先端に付着していないことを示している。よって、探針先端には溶液中で形成されたウェハ表面のSiO_xが付着していると考えられる。

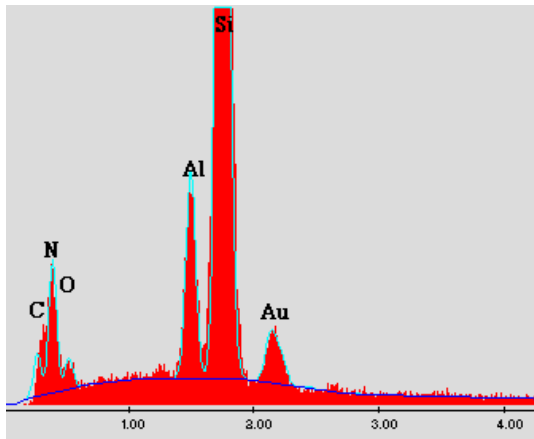
実験後の探針先端のSEM観察像とEDXによる分析結果からウェハ表面のSiO_xがAFM先端に凝着し、ウェハ表面から除去されたと考えられる。



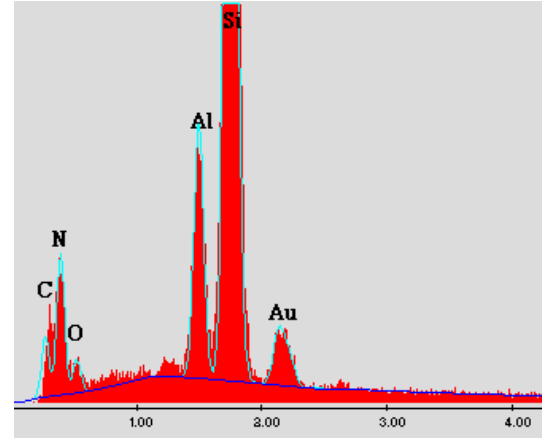
(a) 未使用



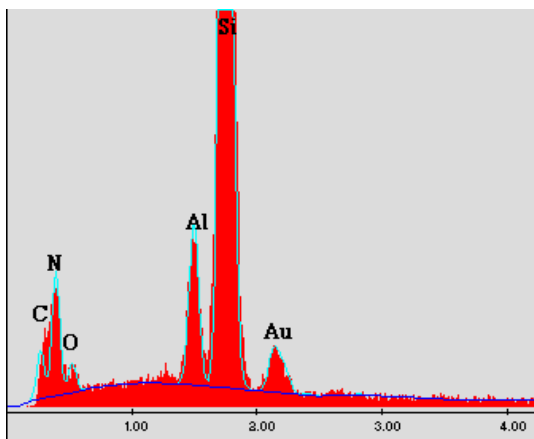
(b) pH7 (Pure Water)



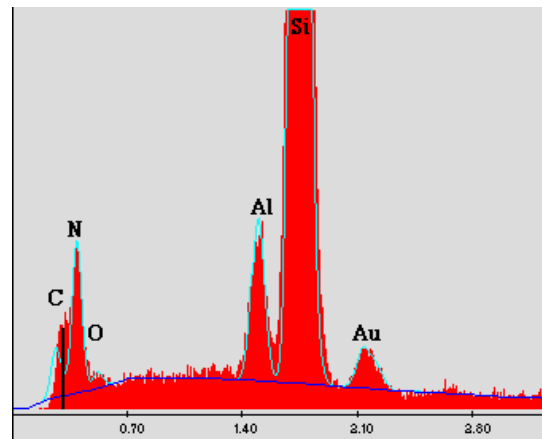
(c) pH8.5 (NH₄OH)



(d) pH8.5 (KOH)



(e) pH10 (NH₄OH)



(f) pH10 (KOH)

図 6.15 EDX による分析結果

6.4 結言

AFM を用いた実験を行い，CMP 中の研磨粒子とウェハ表面の状態を調べた．フォースカーブ測定から研磨粒子とウェハ表面との間に働く力とウェハ表面の化学反応層の硬さを調べ，探針を押し込む実験では探針先端を研磨粒子と見立てて第 5 章で示した凝着除去現象が発生しているかを調べた．得られた結果を以下に示す．

- (1) 溶液中でのフォースカーブ測定から NH_4OH 中の吸着力は純水中の吸着力よりも大きく，結合力も同様の結果であった．
- (2) フォースカーブの Trace Curve を用いた解析結果から純水中，スラリー中ともにウェハ表面に軟質な化学反応層が形成されていることがわかった．また，ヤング率の算出結果からスラリー中の化学反応層の方が純水中のものよりも軟質であることがわかった．
- (3) 溶液中での AFM 探針の押し込み実験から探針先端にウェハ表面の SiO_x が凝着していることがわかった．pH8.5，pH10 と pH 値を上げた場合でも凝着が確認でき，化学種の違う NH_4OH ， KOH 溶液中でも凝着が発生した．

これらの実験結果から，スラリー中の研磨粒子は軟質なウェハ表面に吸着し，結合した後，凝着作用によりウェハ表面の材料を除去すると考えられる．よって第 5 章で提案した凝着除去モデルが成り立つことを実験的に示すことができた．つまり CMP 中の粒子の機能はウェハ表面へと食い込み，引っ掻くような機械的な作用で材料除去が行われるのではなく凝着現象を生じることでウェハ表面の材料を除去していると考えられる．

参考文献

- 6.1) 瀬田聡子, 豎山佳邦, 西岡岳, 宮下直人 : SiO₂ 膜の化学的機械研磨におけるトライボロジー, 電子情報通信学会誌, 54 (2002-10), pp.17-21.
- 6.2) 瀬田聡子, 西岡岳 : 原子間力顕微鏡を用いたシリコン酸化膜研磨メカニズムの研究, 応用物理, 73 巻, 3 号 (2004) pp.368-372.
- 6.3) Bhanu P. Jena and J. K. Heinrich Hörber, eds.,: Methods in Cell Biology, Vol.68, Academic Press (2002).
- 6.4) Fung, Y. C.:Biomechanics-Mechanical Properties of Living Tissues, Springer, New York (1993).
- 6.5) Johnson, K. L.: Contact Mechanics, Cambridge University Press (1994).
- 6.6) Treloar, L. R.: The Physics of Rubber Elasticity, Clarendon Press (1975).
- 6.7) 米沢富美子 著 : ブラウン運動, 共立出版 (1986).
- 6.8) 一井崇 : 原子間力顕微鏡の発展と最近の動向, 表面技術, Vol.59, No.12 (2008) pp.806-811.

第 7 章 研磨実験による凝着現象の確認

7.1 緒言

第 6 章では AFM を用いた実験の結果から CMP 中の研磨粒子による凝着除去モデルが妥当なモデルであることを示した. 本章では, 実際に SiO₂ ウェハの CMP を行い, スラリーに含まれる研磨粒子の変化を観察した. 凝着除去が発生していると考えるとスラリー中の研磨粒子は研磨前と研磨後で, 大きさが変化しているはずである. この予測が成り立つか検証するために研磨粒子による凝着除去作用が発生しやすい研磨装置を考案し研磨前と研磨後の研磨粒子の粒径計測と透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope: TEM)による表面観察により分析を行った. また, スラリー中の研磨粒子がウェハ表面へと作用しやすい微小な凹凸形状を有するポリシングパッドを作成し, 研磨実験を行って, 考察を行った.

7.2 研磨実験

7.2.1 実験概要

図 7.1, 図 7.2 に実験装置を示す. この装置はスラリーをスラリープールと呼ぶ部分に溜めた状態で研磨を行う装置である. この状態で研磨を行うと, スラリー中の一定量の研磨粒子が繰り返しウェハへと作用し続けることになり, 凝着除去作用の頻度が増大する. 実験条件は表 1 の通りである. スラリーは粉末状のフュームドシリカを KOH 溶液に分散させものを使用した. 1 次粒子の粒子径が 5~50nm である粉末状のフュームドシリカを溶液中に分散させると 100~300nm の 2 次粒子として液中で安定する^{7,1)}と言われており, 本実験で使用したスラリーも粒子径が 100~300nm の 2 次粒子として液中に存在していると推測できる. 研磨前と研磨後のスラリー中の研磨粒子の粒径をダイナミック光散乱光度計(大塚電子製 DLS8000)で計測した. この装置は溶液中の粒子の粒径分布を測定することができ, 同時に分散性を評価できる. 粒径計測を行う試料は超音波で分散性を向上させた後に粒径測定を行った. また, 研磨前と研磨後のスラリー中の研磨粒子を TEM(日立製作所製 H-9000NAR)を用いて観察し, 研磨粒子の形状を評価した.

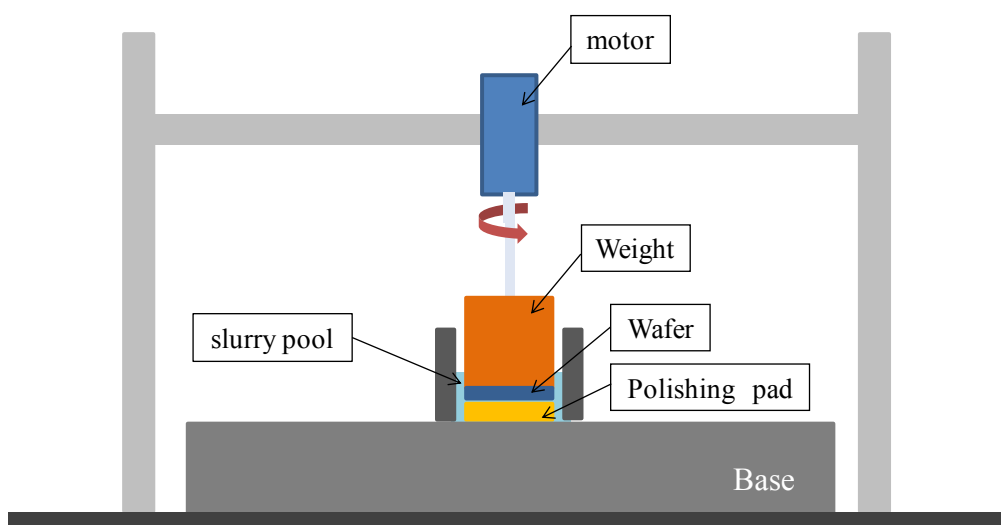


図 7.1 研磨実験装置模式図

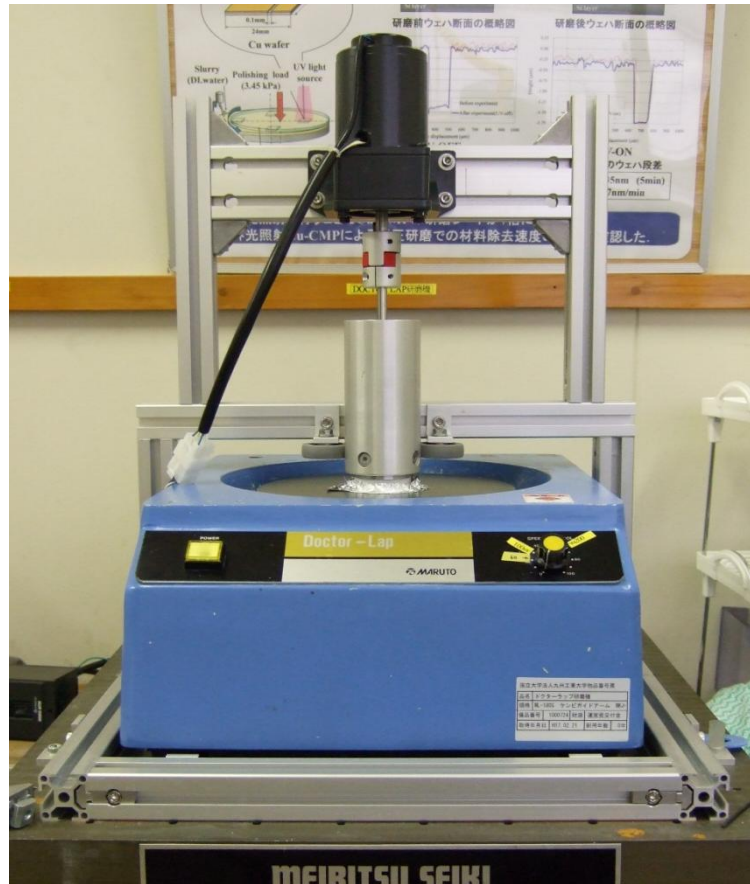


図 7.2 研磨実験装置外観図

表 7.1 研磨実験条件

Slurry	particle	Fumed silica
	particle diameter #1	16 [nm]
	pH	10(KOH)
	concentration	10 [wt%]
Wafer		SiO ₂ wafer
Polishing pad		IC1000
Pressure		5 [psi]
Polishing time		30 [min]
Moter rotation rate		60 [rpm]
Temperature		25 [°C]

7.2.2 実験結果と考察

粒径計測装置による測定結果を図 7.3, 表 7.2 に示す. 研磨前は粒子径のピークが 160nm 付近にあるが、研磨後のピークは 191nm 付近に移動していた. 研磨前の平均粒子径は 148nm, 標準偏差は 43.8 であり, 研磨後の平均粒子径は 207.4nm, 標準偏差は 42.9 であった. 研磨前と研磨後では平均粒子径は研磨後の方が大きくなり, 粒子径分布は粒子径が大きくなる方向へとシフトしていることがわかった. また, それぞれのグラフの形状を比較すると類似した形状であることから, 研磨前と研磨後の分散状態は同じであると考えられる. これらの結果から研磨後の粒子の表面にはウェハ表面の物質が付着し, 粒子径が大きくなっている可能性があると言える.

表 7.2 研磨前と研磨後の粒径計測結果

	ピーク	平均粒子径	標準偏差
研磨前	160nm	148nm	43.8
研磨後	191nm	207.4nm	42.9

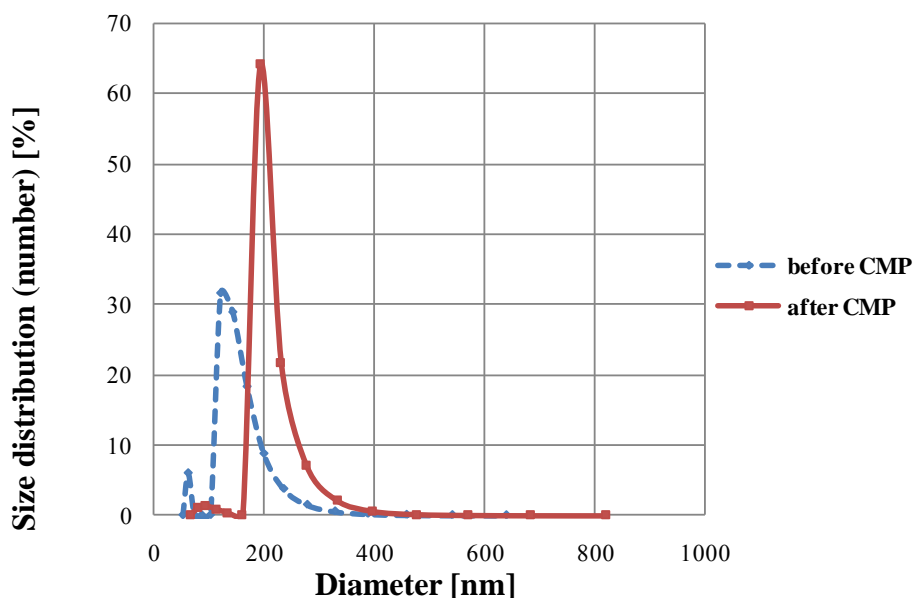


図 7.3 研磨前と研磨後の粒径と強度の関係

TEM による観察結果を図 7.4 に示す. 研磨前と研磨後では粒子の形状に大き

な違いはない。粒子の表面形状にも違いは見られないが、研磨後の研磨粒子は研磨前と比べて粒径が大きくなっていることがわかる。この観察結果から、研磨後のスラリー中の研磨粒子は凝着によって粒径が大きくなっていると考えられる。

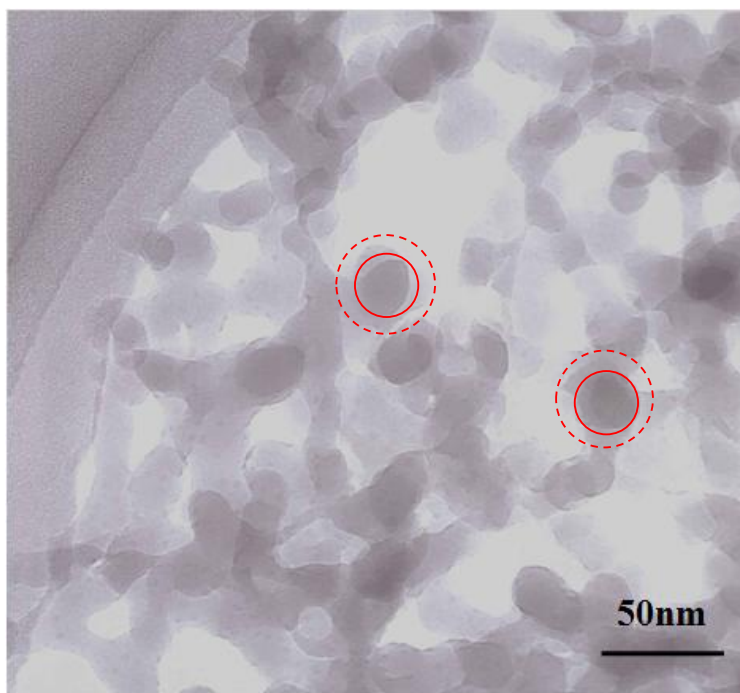


図 7.4 研磨前のスラリー中の研磨粒子の TEM 観察像



図 7.5 研磨後のスラリー中の研磨粒子の TEM 観察像

7.3 パッド表面形状と研磨量

7.3.1 実験概要

ポリシングパッド表面は微小な凹凸形状を有している^{7.2)~7.5)}と言われており、この凹凸と作用研磨粒子との関係を調べることはCMPの材料除去を考える上で重要である。そこで、規則的な微小凹凸パターン形状を有するポリシングパッドと微小凹凸のまったくないポリシングパッドを用いた研磨実験を行って評価を行った。実験装置外観図を図7.6に示す。ポリシングテーブルとウェハキャリアは独立して動く構造となっている。実験条件を表7.3に示す。研磨実験後に膜厚測定を行い研磨レートを求めた。実験にはピラミッド型パターンを有するマイクロパターンパッド、マイクロパターンパッドと同質のポリウレタンを使った微小凹凸のないポリシングパッドの2種類のポリシングパッドを使用した。マイクロパターンパッドの観察画像を図7.7、微小凹凸のないポリシングパッドの観察画像を図7.8に示す。

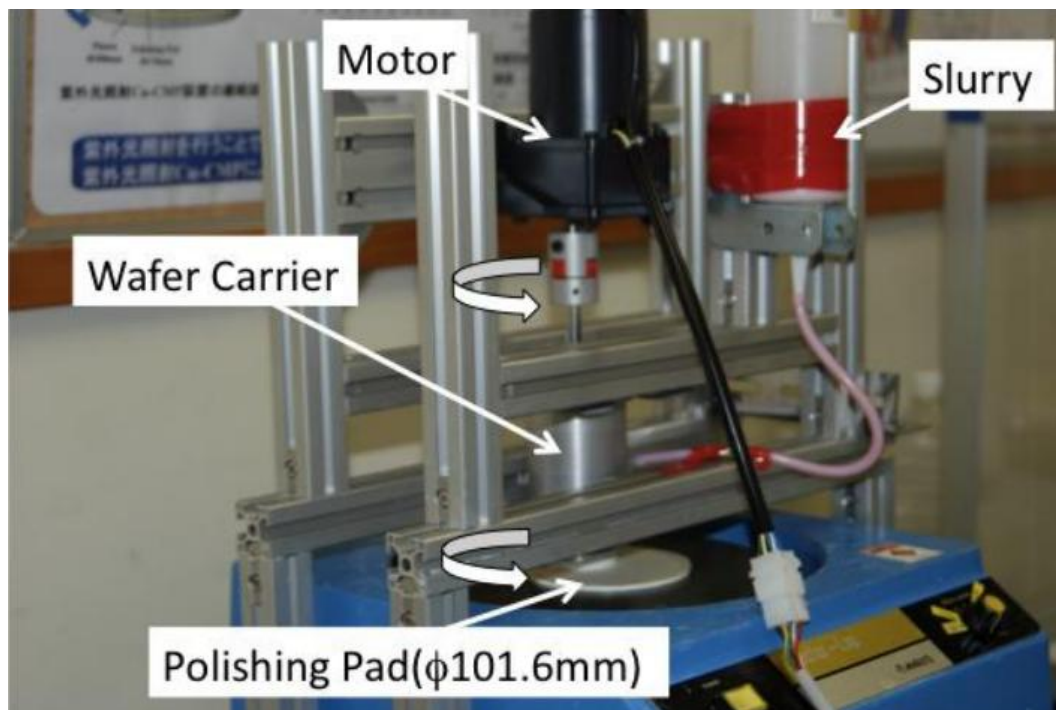
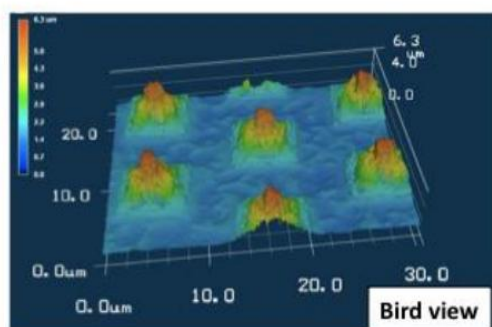
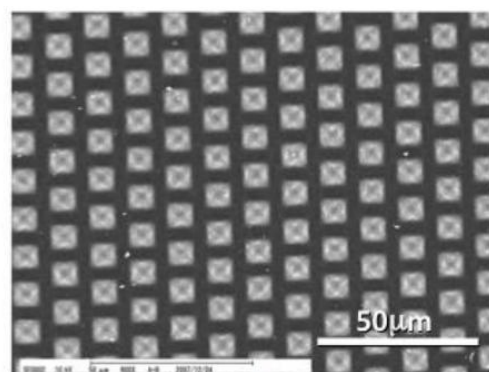
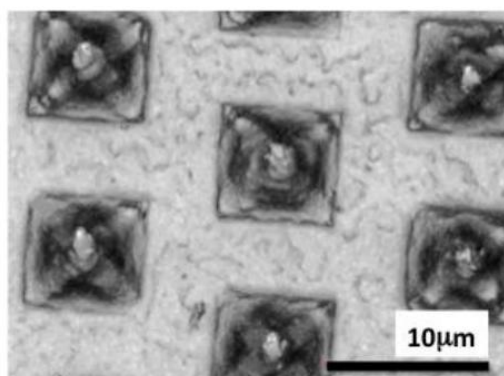


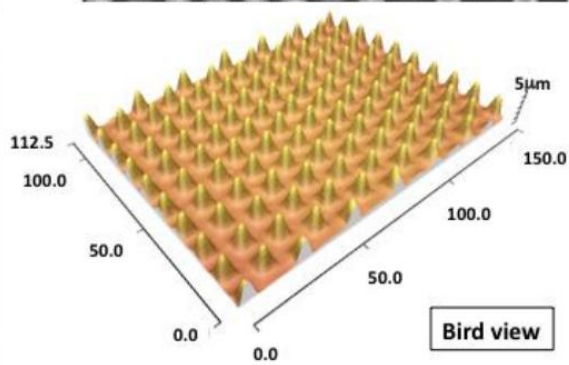
図 7.6 研磨実験装置

表 7.3 実験条件

被ポリシング材	□20 mm SiO ₂ 膜付Siウェハ
ポリシングパッド	微小凹凸のないパッド
	ピラミッド形状マイクロパターンパッド (無発泡ポリウレタン: Shore D 65-70)
スラリー	SiO ₂ スラリー SS-25(Cabot) (KOH, pH11, Silica 12.5 wt%)
パッド回転数/ウェハ回転数	60 min ⁻¹
ポリシング圧力	34.5 kPa (=5 psi)
ポリシング時間	1,3,5,7 min
膜厚測定装置	エリプソメーター



(a) CLSM image



(b) 3D-SEM image

図 7.7 マイクロパターンパッドの観察画像

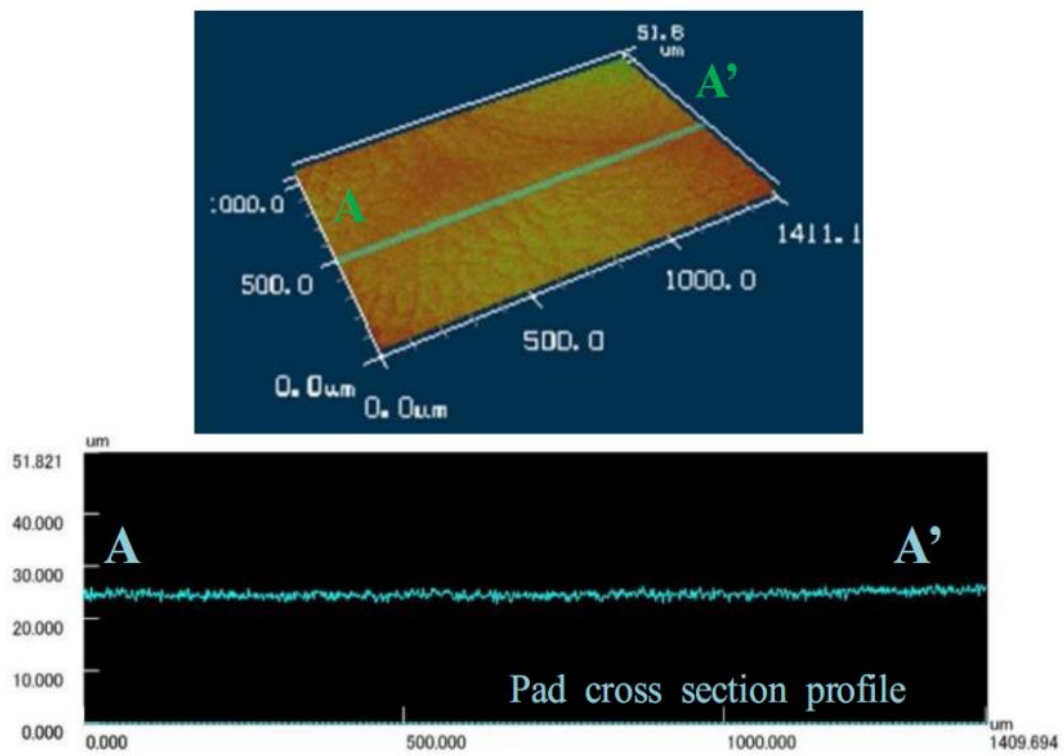


図 7.8 微小凹凸のないパッドの観察画像

7.3.2 実験結果と考察

実験結果を図 7.9 に示す. マイクロパターンパッドの方が微小凹凸のないポリシングパッドと比べて明らかに研磨レートが高いという結果が得られた. この結果からスラリー中の研磨粒子をウェハ表面へと導入する構造が研磨に与える影響が大きいと考えられ, マイクロパターンパッドの形状がウェハ表面とポリシングパッドとの間に確実な隙間を作ることによってスラリーの流量が増大し, 作用粒子数が増加することで材料除去が発生していると考えられる.

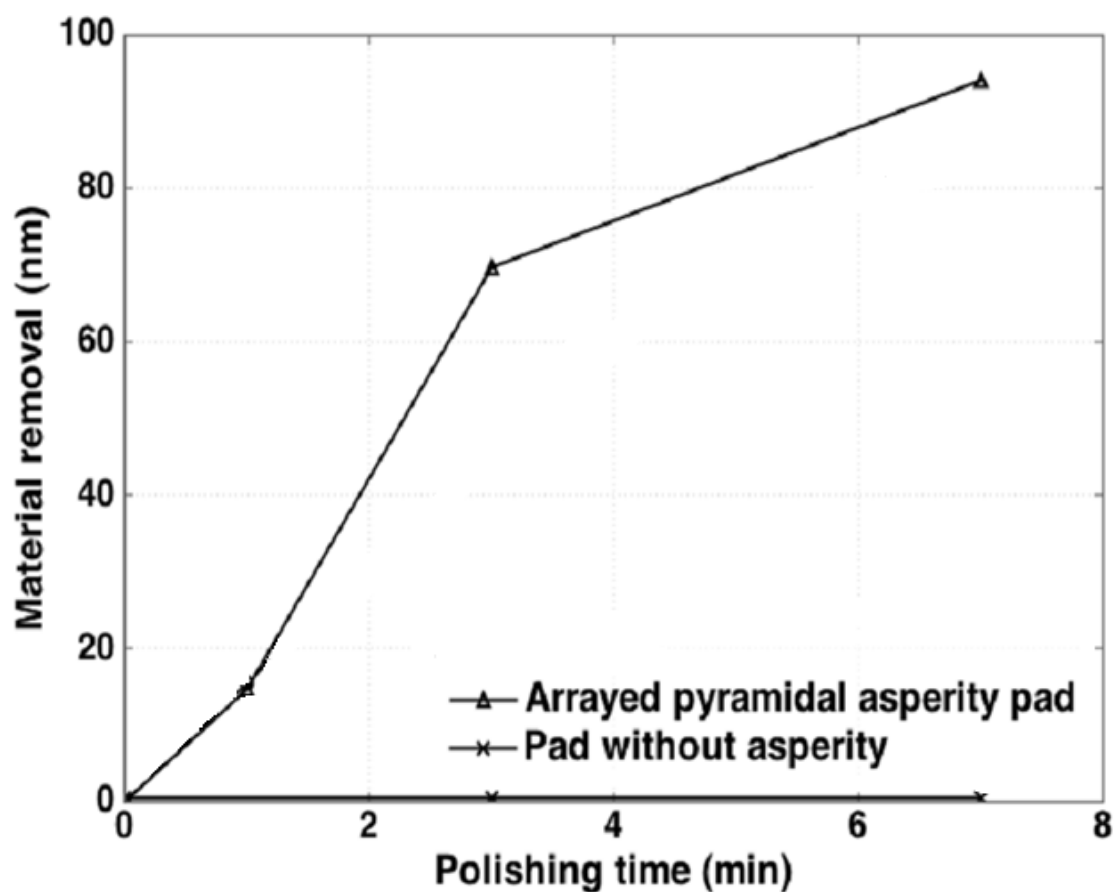


図 7.9 研磨実験結果

7.4 結言

実際に CMP を行うことでスラリー中の研磨粒子の変化を観察した．粒径計測の結果から，研磨後の粒径が定量的に大きくなっていることを示した．TEM の観察像からも研磨後の研磨粒子の粒径が大きくなっていることが確認できた．よって，研磨実験により実際の CMP 中で凝着除去が発生し，ウェハ表面の物質が研磨粒子へと凝着していると考えられる．また，マイクロパターンパッドと微小凹凸のないポリシングパッドを使った研磨実験結果からはスラリー中の研磨粒子がウェハへと作用しやすい形状を有し，ウェハとポリシングパッドとの間に隙間を確保できるポリシングパッドの方が研磨レートは高いことがわかった．この結果からスラリーの流量が増大すると作用粒子数が増加することで研磨レートが向上すると考えられ，研磨レートは凝着する粒子数と関係していると言える．

参考文献

- 7.1) Yoshio Mitani and Takanori Teshima: Formation and Characteristics of Fumed Silica –Flame Analysis and Applicability of Formed Particles for CMP Use-, International Conference on Planarization/CMP Technology, Fukuoka, Japan, Nov.19-21, (2009) pp.375-380.
- 7.2) Sunghoon Lee, Kyoungja Kim and David Dornfeld, "Development of a CMP pad with controlled micro features for improved performance," Proceedings of ISSM 2005 IEEE international Symposium on Semiconductor Manufacturing, pp.173-176, 2005.
- 7.3) Boumyoung Park, Hyunseop Lee, Kihyun Park, Kyoungjae Kim and Haedo Jeong, "Pad roughness variation and its effect on material removal profile in ceria-based CMP slurry", Journal of Materials Processing Technology, Vol.203, Issues1-3, pp.287-292, 2008.
- 7.4) John McGrath and Chris Davis, "Polishing pad surface characterization in chemical mechanical planarisation," Journal of Materials Processing Technology, Vol.153-154, pp.666-673, 2004.
- 7.5) H.Lu, B.Fookes, Y.Obeng, S.Machinski and K.A.Richardson, "Quantitive analysis of physical and chemical changes in CMP polyurethane pad surfaces," Materials Characterization, Vol.49, pp.35-44, 2002.

第 8 章 結 論

本研究ではシリカを含んだスラリーを使用する $\text{SiO}_2\text{-CMP}$ における材料除去現象の未解明な点を調査し、研磨メカニズムを考察しモデル化を行った。本論文では特に CMP の材料除去で最も重要な要素であるスラリーに着目し、現象モデルを構築し実験を行うことでその検証を行った。ウェハ表面化学反応層とスラリー中の粒子の凝着作用により材料除去が発生することを実験で示し、 $\text{SiO}_2\text{-CMP}$ の新しい材料除去メカニズムの考え方を提案できた。各章において、次の結論が得られている。

第 1 章では LSI を高性能、高集積化するために、ウェハ表面の平坦化を行う必要性について述べた。

第 2 章では従来の CMP における材料除去モデルを挙げ、それぞれの特徴を示した。従来の材料除去モデルはスラリー中の研磨粒子のアブレイブな作用により材料除去が発生すると説明しているものがほとんどであるが、削り取る過程で生じると考えられるナノメートルオーダーの加工痕が見られない、ポリシングパッド表面に粒子が弱く結合した状態で、ウェハ表面へと強く食い込むとは考えにくい等、このモデルには問題点があり、ナノ粒子である CMP 用スラリーの反応性に着目したモデルの必要性について述べた。さらに $\text{SiO}_2\text{-CMP}$ でその純度の高さから最も用いられるシリカ粒子を含んだスラリーによる材料除去メカニズムの理解とモデルは過去の研究成果で十分説明されておらず、シリカを含んだスラリーを使用する $\text{SiO}_2\text{-CMP}$ における材料除去現象の未解明な点を調査し、研磨メカニズムを考えモデル化することを研究目的としたことを述べた。

第 3 章ではスラリーの流れの定性的な評価を行い、スラリーは溝形状のないフラットパッドよりも溝形状を有する P15 格子溝パッドの方がウェハ面下へと流入しやすいことを実験的に示した。また、フラットパッドと P15 格子溝パッドを使用した研磨実験の結果からは P15 格子溝パッドの方が研磨量が多いことがわかった。

これらの結果から溝形状とパッド表面上の微小凹凸の形状がスラリーの流れに影響を及ぼし、作用粒子数を変化させることがわかった。よって、スラリーをいかにウェハに作用させるかが重要であると考えられる。

第 4 章ではスラリー中の研磨粒子分布測定の結果と研磨粒子分布モデルの考察から研磨粒子はウェハ表面に稠密に堆積すること、また SiO_2 基板に研磨粒子を堆積させた後、溶液を純水に置換した研磨粒子の分布測定の結果から粒径は 15~50nm であり、50~60nm 間隔で並んで存在していることを示した。

モデル化を行いスラリー中の研磨粒子はすべて同じ粒径で面心立方構造のような状態で液中に存在すると仮定してモデル式を用いて計算を行い、研磨粒子の間隔は 55.6nm~78.7nm となると推測した。測定結果とモデル式を比較すると、研磨粒子の間隔が十数%の誤差で一致していることがわかった。

このことから、スラリー中の研磨粒子は稠密充填状態に分布していると考えられる。

第 5 章では分子動力学によるシミュレーション、ガラス研磨中の化学反応論、摩耗現象における凝着摩耗の 3 つの考え方を示し、それらを基礎として CMP 中の材料除去モデルを考えた。CMP 中ではスラリー中の研磨粒子とウェハ表面との間に凝着による除去作用が働いていると推測し、そのモデルを提案した。

第 6 章では AFM を用いた実験を行い、CMP 中の研磨粒子とウェハ表面の状態を調べた。フォースカーブ測定から研磨粒子とウェハ表面との間に働く力とウェハ表面の化学反応層の硬さを調べ、探針を押し込む実験では探針先端を研磨粒子と見立てて第 5 章で示した凝着除去現象が発生しているか調べた。得られた結果から、スラリー中の研磨粒子は軟質なウェハ表面に吸着し、結合した

後、凝着作用によりウェハ表面の材料を除去すると考察した。

第7章では実際に CMP を行った後、スラリー中の研磨粒子の変化を観察した。粒径計測の結果から、研磨後の粒径が定量的に大きくなっていることを示した。TEM の観察像からも研磨後の研磨粒子の粒径が大きくなっていることが確認できた。また、パッド表面に微小凹凸を有するポリシングパッドと微小凹凸のないポリシングパッドを使った研磨実験結果からはウェハへとスラリー中の研磨粒子が多く作用する形状を有するポリシングパッドの研磨量が多くなった。この結果から、凝着する粒子数が増大したことによって、研磨量が多くなったと言える。これらの研磨実験により実際の CMP 中で凝着除去モデルが成り立ち、凝着する研磨粒子を増やすことで研磨量が増加することを示した。

本研究では SiO₂ の CMP のモデル化を行うためにスラリーの流れと CMP との関係、スラリー中の研磨粒子の分布、AFM を用いた CMP のシミュレーション実験と研磨実験から CMP の材料除去メカニズムを解明していき、研磨粒子の凝着による材料除去モデルを考え、そのモデルの検証を実験により行った。

SiO₂-CMP の材料除去現象は次のように発生すると考えられる。

1. ウェハ表面に化学反応層が形成され、その層は原子間結合力が弱まった軟質なものである。
2. スラリー中の粒子は吸着力によって化学反応層に接触、転動し凝着する。
3. スラリーの流れにより粒子はウェハ表面から離脱しウェハ表面から凝着物質を除去する。

この新しい材料除去メカニズムの考え方を応用することで CMP シミュレーションシステムの構築、凝着除去を考慮した高性能スラリーとパッドの開発、低コスト化を目的とした研磨条件の最適化、機械装置開発への貢献が出来ると考えられる。

関連論文 および 口頭発表

1 関連論文

1. Keiichi Kimura, Yuichi Hashiyama, Panart Khajornrungruang, Hirokuni Hiyama and Yoshihiro Mochizuki: Study on Material Removal Phenomena in CMP Process, International Conference on Planarization/CMP Technology, Dresden, Germany, October 25-27, (2007) pp.201-205
2. 橋山雄一, 木村景一, カチョーンルンルアン・パナート: 角形石英ガラス研磨におけるスラリー流れに関する研究, 砥粒加工学会誌, 第 53 巻 第 9 号 (2009.9) pp.578-582
3. Yuuichi Hashiyama, Panart Khajornrungruang and Keiichi Kimura: Study on Material Removal Model in Oxide CMP Process, 3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Kitakyushu, Japan, November 11-13, (2009) 1B7.
4. Panart Khajornrungruang, Keiichi Kimura, Akiyoshi Baba, Naoaki Takahashi, Yuichi Hashiyama, Keisuke Yasuda: Development of Periodically Arrayed Micro Pyramid Asperity on Polishing Pad Surface for CMP process using Lithography, 3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Kitakyushu, Japan, November 11-13, (2009) 1B8.
5. Yuuichi Hashiyama, Panart Khajornrungruang, Keiichi Kimura: Study on functionality of fine particles in slurry for oxide CMP process, International Conference on Planarization/CMP Technology, Fukuoka, Japan, Nov.19-21, (2009) pp.370-374.

2 口頭発表

1. 橋山雄一: CMP プロセスシミュレーションの研究, 精密工学会九州支部宮崎地方講演会第 5 回学生研究発表会講演論文集 pp103
2. 橋山雄一: CMP プロセスシミュレーションの研究, 日本機械学会九州学生会第 3 6 回卒業研究発表講演会(No.058-2)論文集 pp103-104
3. 橋山雄一, 木村景一, カチョーンルンルアン・パナート, 渡辺伸人: CMP におけるプロセスシミュレーションの研究, 精密工学会九州支部鹿児島地方講演会第 6 回学生研究発表会講演論文集 pp1-2
4. 橋山雄一, 木村景一, カチョーンルンルアン・パナート: CMP におけるポリシングパッド表面のモデル化の試み, 日本機械学会関東支部第 1 2 期総会講演会講演論文集 pp25-26
5. 橋山雄一, 木村景一, カチョーンルンルアン・パナート, 上野和樹, 今村聡: CMP プロセスにおける材料除去モデルの研究, 精密工学会九州支部福岡地方講演会講演論文集 pp11-12
6. 橋山雄一, 木村景一, カチョーンルンルアン・パナート: CMP プロセスにおける材料除去モデルの研究, 日本機械学会関東支部第 1 3 期総会講演会講演論文集 pp237-238
7. 橋山雄一, 木村景一, カチョーンルンルアン・パナート: CMP プロセスにおける材料除去モデルの研究-第二報-原子間力顕微鏡を用いた材料除去現象の検討, 日本機械学会関東支部第 1 4 期総会講演会講演論文集 pp409-410

-
8. 橋山雄一，木村景一，カチョーンルンルアン・パナート：石英ガラス研磨におけるスラリー流れに関する研究，砥粒加工学会学術講演会講演論文集 pp275-278
 9. 橋山雄一，木村景一，カチョーンルンルアン・パナート：酸化膜 CMP プロセスにおける材料除去モデルの研究，精密工学会秋季大会講演論文集 pp851-852
 10. 橋山雄一，木村景一，カチョーンルンルアン・パナート：CMP プロセスにおける材料除去モデルの研究-第三報-スラリー中の微粒子による材料除去現象の検討-，日本機械学会関東支部第 15 期総会講演会講演論文集 pp461-462

謝 辞

本論文は、九州工業大学大学院 情報工学研究科 情報システム専攻 木村研究室にて著者が行った研究の成果をまとめたものです。本研究の遂行にあたり、終始にわたり丁寧なご指導を頂きました九州工業大学大学院 情報工学研究院 機械情報工学研究系 木村景一教授に謹んで感謝の意を表し心から御礼申し上げます。

本論文の審査にあたり鈴木裕教授、榎原弘之教授には貴重なアドバイスと強力なバックアップをしていただき、ありがとうございました。

九州工業大学 パナート・カチョーシルンルアン助教には日頃から有益なアドバイスと熱心なご指導をしていただき、大変感謝しております。

株式会社荏原製作所 檜山浩國氏、望月宣宏氏には多大なご支援と、貴重なアドバイスを頂きました。謹んで感謝の意を示します。

木村研究室の友人、後輩にも多大な協力をしてもらい、感謝の気持ちでいっぱいです。

最後に大学院まで通わせてくれた、両親と妹に深く感謝し、学位を取ったことに満足せず、今後もエンジニアとして研究者として日々研鑽に励んでいきたいと思います。

2010 年 3 月

橋山 雄一